



USO DEL CÁLCULO NUMÉRICO CFD PARA EL ESTUDIO DE ACTUACIONES DE UNA MOTOCICLETA DE COMPETICIÓN



Mauro Botella Mompó

1. Introducción	3
2. Antecedentes	4
3. Objetivos	5
4. Datos de partida	6
4.1 Conclusiones iniciales	6
4.2 Reglamento Técnico de Moto2 del CEV	9
5. Fundamentos Teóricos	10
5.1 Fluidos	10
5.1.1 Definición y propiedades de los fluidos	10
5.1.2 Ecuaciones de Estado	14
5.1.3 El principio de Bernoulli y el principio de Venturi	18
5.1.4 Flujo laminar y turbulento	20
5.1.5 Número de Reynolds	20
5.2 Aerodinámica de Motocicletas	22
5.2.1 Resistencia Aerodinámica	22
5.2.2 Flujo de aire interno	29
5.2.3 Sustentación y Centro de presiones	29
5.2.4 Túnel de viento	33
5.2.5 Evolución de los carenados de competición	39
5.3 CFD (Dinámica de Fluidos Computacional)	47
6. Diferentes vías de trabajo	50
6.1 Diseño	50
6.1.1 Diseño asistido por ordenador (CAD)	50
6.1.2 Ingeniería Inversa	51
6.2 Análisis Aerodinámico	53
6.2.1 Túnel de viento	53
6.2.2 Túnel Hidrodinámico	54
6.2.3 Pruebas en pista	54
6.2.4 CFD	54
7. Métodos de trabajo adoptados	57
7.1 Software	58
7.2 Creación del modelo CAD	60
8. Desarrollo del trabajo	61
8.1 Medios informáticos de cálculo	61
8.2 Proceso de aprendizaje de los programas	62
8.2.1 Gambit	62
8.2.2 Fluent	81
8.2.3 TGrid	95
8.3 Pre-Procesado de las motocicletas con el "GAMBIT"	96
8.3.1 Geometría a analizar	96
8.3.2 Adecuación de la geometría para su tratado en CFD	96
8.3.3 Túnel de viento virtual	100

8.3.4	<i>Mallado</i>	101
8.3.5	<i>Condiciones de contorno</i>	102
8.4	<i>Creación de la “malla ambiente” con el “TGrid”</i>	103
8.5	<i>CFD con el “FLUENT”</i>	103
9.	<i>Simulaciones</i>	104
9.1	<i>Graficas de Residuos</i>	104
9.2	<i>Simulaciones (Mapas Gráficos)</i>	107
9.2.1	<i>Mapas de presión</i>	108
9.2.2	<i>Mapas de velocidades</i>	113
9.2.3	<i>Vectores de velocidades</i>	119
9.2.4	<i>Comparación de Estelas</i>	125
9.2.5	<i>Comparación de Estelas de forma Analítica</i>	144
9.3	<i>Cálculos y Análisis de los resultados</i>	152
9.3.1	<i>Resultados numéricos</i>	152
9.3.2	<i>Coeficiente de resistencia Aerodinámico</i>	153
9.3.3	<i>Fuerza de resistencia al avance</i>	155
10.	<i>Conclusiones</i>	157
11.	<i>Bibliografía</i>	160
	 <i>Anexo I. Resultados con Piloto</i>	 162

1. Introducción

Esta memoria pretende ilustrar el desarrollo del Proyecto de Fin de Carrera *Uso del cálculo numérico CFD para el estudio de actuaciones de una motocicleta de competición* de los alumnos Álvaro Ramos Cenzano y Mauro Botella Mompó.

Se centra en el estudio de las fuerzas aerodinámicas ejercidas sobre una motocicleta de competición, en concreto de una Moto2 del campeonato de España de velocidad (CEV), por medio de programas de simulación.

Los capítulos del 1 al 4, describen por qué surgió el Proyecto, los datos a tener en cuenta del reglamento oficial de Moto2 del CEV (centrándonos sobre todo en los aspectos que afectan a la Aerodinámica, como puede ser el carenado), y los objetivos que se pretenden hallar con este proyecto.

Se hará una pequeña introducción a la aerodinámica general para después profundizar en la aerodinámica automovilística y sobretodo en la de las motocicletas. Pasando por el interés que tiene la aerodinámica a diferentes niveles (comercial y de competición), y su evolución a lo largo de la historia.

Se analizarán los diferentes métodos de trabajo que se podrían usar para el estudio aerodinámico, centrándose sobre todo en la técnica de estudio informático por Dinámica de Fluidos Computacional o CFD.

Dado que el proyecto está basado en unas motocicletas reales, surgirán una serie de problemas en el uso de los métodos numéricos que se irán solventando, intentando mantener la estructura lo más fiel posible a los modelos reales. Todos estos problemas y sus soluciones se detallarán con la intención de que puedan servir de ayuda para futuros estudios.

Tras las simulaciones con los programas CFD correspondientes a los distintos modelos de motocicleta, se compararán los resultados para ayudar en la definición del modelo final.

El proyecto concluirá con las conclusiones obtenidas por los alumnos.

2. Antecedentes

El proyecto surgió debido a la enorme afición a las motos de los estudiantes responsables de este proyecto fin de carrera, Álvaro Ramos Cenzano y Mauro Botella Mompó, y al conocimiento por parte de éstos de la relación del profesor Santiago Pindado Carrión con Juan Manuel Navarro y José Ángel Sánchez, General Manager y Gerente respectivamente de la empresa de ingeniería dedicada al motociclismo, Ariane Tech. Así surgió la oportunidad de poder colaborar con un equipo que actualmente está compitiendo en el Campeonato de España de Velocidad (CEV) en la categoría de Moto2, llamado Motorrad Competición. Éste fue el único equipo que compitió con la Ariane2 durante la temporada 2012 con muy buenos resultados, ya que sus dos pilotos principales quedaron 2º y 3º en la clasificación general, y Ariane Tech quedó como campeón de constructores.

Ariane Tech brindó la oportunidad de realizar un estudio aerodinámico con la intención de optimizar su motocicleta aerodinámicamente, ya que, tras comentarlo con otros equipos y pilotos del campeonato, su motocicleta les ofrecía un gran rebufo facilitando que les adelantasen en las rectas.

Esta motocicleta, en lo referente a los aspectos técnicos, tiene que seguir una reglamentación que más tarde se mencionará y a la que hay que ceñirse para que pueda encuadrarse dentro de la categoría.

A lo largo de los meses de Septiembre y Octubre se pusieron en contacto con los miembros del equipo y se celebró una reunión con José Ángel para hacer un primer contacto y hablar de los aspectos de la moto y en cuáles de ellos se veía posible realizar una mejora para así mejorar el comportamiento global de la misma. Previo a esta reunión el equipo proporcionó unas imágenes de la moto que se pretendía mejorar y de algunas de sus competidoras para hacer una primera comparación visual de la que empezar a partir.

Una vez se tenía en mente en qué se iba a centrar el proyecto, qué se esperaba de los alumnos y lo que se necesitaba que proporcionase el equipo; se dedicaron los meses iniciales, mientras los de Ariane Tech preparaban las piezas CAD, a aprender a usar los programas que se utilizarían para la realización del proyecto. Éste aprendizaje se basó en el seguimiento algunos tutoriales que se obtuvieron de internet, junto con las enseñanzas del profesor Pindado y lo que se obtuvo de la experiencia y los errores con ejemplos sencillos.

3. Objetivos

Como ya se ha mencionado, el objetivo de este proyecto es mejorar la eficiencia aerodinámica de la motocicleta de competición Ariane2. Aparte de esto, el proyecto también constituye una gran oportunidad para los alumnos puesto que se les introduce en un proyecto real que les podrá ayudar a conocer la dinámica de trabajo de una empresa, a la vez que plantea los problemas que podrán encontrar en futuros puestos de trabajo.

Dado que durante la carrera no se ha visto ningún tipo de estudio CFD ni se han trabajado con este tipo de programas, el proyecto también les inicia en los programas de este tipo, que en un futuro podrá facilitarles conseguir ciertos puestos de trabajo.

4. Datos de partida

En un primer momento se proporcionaron unas imágenes de la motocicleta que se quería mejorar y de sus competidoras directas para hacer comparaciones. A parte de las imágenes se les comunicó a los alumnos que otros pilotos del campeonato habían indicado que su moto les proporcionaba un gran “rebufo”, lo que en recta favorecía a los otros pilotos a adelantar a los de la Ariane2.

Una vez se tenían todos estos datos, se investigaron diferentes artículos y estudios aerodinámicos y se compararon las motocicletas entre sí, aparte de buscar otras motocicletas de otras categorías para comprobar que los hallazgos pudiesen ser correctos.

Se llegó a la conclusión de que había varias diferencias con la mayor parte del resto de las motos que pudiesen estar afectando tanto a la resistencia directa de la moto con el viento, como a la generación de “rebufo”, torbellinos de corriente en la parte posterior de la motocicleta.

Dado que estas conclusiones fueron halladas sin ningún tipo de cálculo numérico, ni programa informático, se consultó con el profesor Pindado si, a su parecer, los hallazgos estaban enfocados en el buen camino antes de que se presentasen a José Ángel, con quien tenían una reunión marcada para conocerse y presentar las ideas iniciales.

4.1 Conclusiones iniciales

A partir de las imágenes que se proporcionaron, sus comparaciones y las lecturas de diferentes artículos sobre la aerodinámica de motocicletas se llegó a varias conclusiones. Aunque en las imágenes comparativas sólo se comparan carenados, pues el chasis y colín de ambas motos es el de la Ariane2.



Figura 4.1: Perfil de la Ariane2 2012.

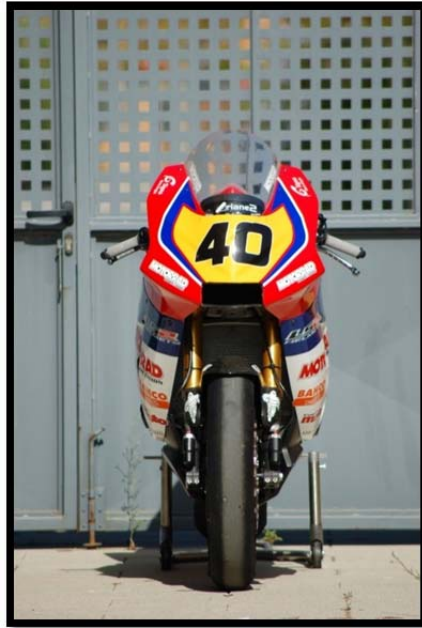


Figura 4.2: Vista frontal de la Ariane2 2012.



Figura 4.3: Superposición del carenado de la moto referencia sobre el de la Ariane2 2012.

En primer lugar, la pendiente inicial del frontal del carenado es demasiado abrupta, lo que puede estar ocasionando una gran resistencia.

En segundo lugar, el carenado deja demasiado expuesto el motor, interrumpiendo la continuidad del flujo de aire lateral, aparte de poder estar creando disrupciones del flujo debido al calor que desprende el motor.

Por último y lo parece que es más importante para evitar la generación de ese “rebufo”, es el colín trasero. Éste, en relación a los otros con los que se ha comparado, está demasiado elevado y tiene un ángulo demasiado brusco como para dar continuidad a la espalda del piloto.



Figura 4.4: Otros modelos de motocicletas de la categoría de Moto2 que se usaron para determinar los principales caminos a seguir. Dos modelos de años diferentes de la marca “Alfa”. Las dos superiores de la temporada 2012, del piloto Toni Elías, y la inferior de la temporada 2011, del piloto Julián Simón.

4.2 Reglamento Técnico de Moto2 del CEV

A continuación se describen brevemente, las normas del CEV que afectan a nivel aerodinámico. Ya que las diferentes soluciones que se adopten para los problemas aerodinámicos hallados con el estudio CFD deberán encuadrarse dentro de estas normas.

Diseño de Chasis, Construcción y carenado

- a. El chasis será un prototipo, diseñado y construido siguiendo las normas técnicas del FIM Grand Prix. El chasis, basculante, depósito de combustible, asiento y carenado/colín, no pueden provenir de una motocicleta de producción, deben ser prototipos.
- b. El carenado inferior debe estar fabricado para contener, en caso de incidente en el motor, al menos la mitad de la totalidad del aceite y del líquido de refrigeración del motor (mínimo 5 litros). La parte inferior de las aberturas en el carenado debe estar situada al menos a 50mm por encima de la parte interior del carenado.
- c. El carenado inferior deberá incluir un agujero de 25mm, situado en la parte delantera del mismo. Este agujero debe permanecer cerrado mediante un tapón en caso de pista seca y deben abrirse únicamente en caso de lluvia.

5. Fundamentos Teóricos

En este apartado se muestran unos conceptos básicos de fluidos y aerodinámica que ayudarán a comprender mejor el trabajo realizado en este Proyecto. Comienza desde los conceptos más básicos hasta llegar a temas más específicos relacionados con el mundo de las motocicletas de competición. Se muestran desde un punto de vista práctico para hacer más sencilla si cabe su comprensión.

En primer lugar y antes de entrar de lleno a los fundamentos teóricos de la aerodinámica de motocicletas, se va a explicar el fenómeno que al ya se ha hecho alusión llamado “rebufo”. Éste fenómeno se crea en la parte trasera de los vehículos y consiste en unas turbulencias que crean una presión negativa. Ésta presión negativa además de atraer al piloto que se encuentra detrás, también crea un succión hacia atrás de la moto que lo está creando. Por lo tanto, no sólo disminuye su velocidad punta, sino que además atrae al piloto que está detrás hacia él y le proporciona una pantalla que evita que el piloto trasero genere tanta resistencia al aire.

5.1 FLUIDOS

5.1.1 Definición y propiedades de los fluidos

Todos los cuerpos de la naturaleza son más o menos deformables y no hay ninguno que se ajuste exactamente a la clasificación clásica de sólidos, líquidos y gases.

Sin embargo, en aproximación macroscópica se llama sólido elástico al cuerpo que se deforma al actuar sobre él una fuerza y la deformación es proporcional al esfuerzo, pero ésta desaparece al cesar la fuerza que la produjo; y se llama fluido al cuerpo que se deforma permanentemente al actuar sobre él una fuerza.

Bajo la denominación de fluidos se comprenden a los líquidos y los gases entre los que existe la diferencia fundamental de que los líquidos tienen volumen propio y los gases llenan totalmente el recipiente que los contiene. El número de aplicaciones en la que se estudian aparte de la aerodinámica es enorme: tuberías, barcos, ventilaciones y refrigeraciones, ríos, molinos de viento, motores, aviones y meteorología entre otros. Casi todas las cosas que existen en este planeta o son un fluido o se mueven inmersas o cerca de un fluido. Todos sabemos que los fluidos más cotidianos en nuestras vidas son el aire como gas y el agua como líquido, pero aparte de los innumerables fluidos que puedan existir, hay muchos otros elementos que a pesar de no ser un fluido se comportan como tal, entre ellos las propias personas:



Figura 5.1: Ejemplos de comportamiento de un fluido en elementos cotidianos.

La Mecánica de Fluidos es la rama de la física que estudia el movimiento de los fluidos así como las fuerzas que los provocan. La característica fundamental que define a los fluidos es su incapacidad para resistir esfuerzos cortantes (lo que provoca que carezcan de forma definida). También estudia las interacciones entre el fluido y el contorno que lo limita. La hipótesis fundamental en la que se basa toda la mecánica de fluidos es la hipótesis del medio continuo. Nos puede proporcionar datos tan variados que se puede llegar a emplear hasta para hacer estudios y planes de evacuación de todo tipo, por ejemplo de ciudades o estadios.

Una fuerza cortante es el componente de fuerza tangente a una superficie, y esta fuerza dividida por el área de la superficie es el esfuerzo cortante promedio sobre el área. El esfuerzo cortante en un punto es el valor límite de la fuerza cortante al área cuando ésta se reduce al punto.

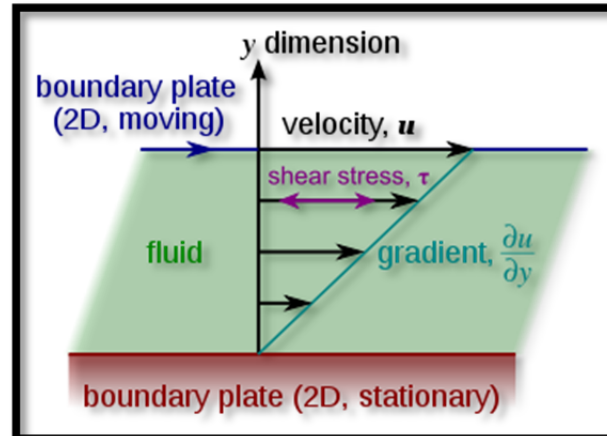


Figura 5.2: Deformación resultante de la aplicación de una fuerza cortante constante.

En la *figura 5.2* se coloca una sustancia fluida entre dos placas paralelas separadas una distancia pequeña siendo ellas lo suficientemente grandes para que las condiciones en sus orillas se puedan despreciar. La placa inferior es fija y se aplica una fuerza F a la placa superior, ejerciéndose entonces un esfuerzo cortante F/A sobre cualquier sustancia entre las placas. A es el área de la placa superior. Cuando la fuerza F_x causa que la placa superior se mueva con una velocidad uniforme (que no sea cero), sin que importe lo pequeña que sea la magnitud de F_x , se puede concluir que la sustancia entre las dos placas es un fluido.

El fluido en contacto inmediato con una frontera sólida tiene la misma velocidad que la frontera, es decir, no hay deslizamiento en la frontera. Este es un hecho experimental que ha sido verificado en un sinnúmero de pruebas con varias clases de fluidos y materiales de frontera. El fluido en el área $NMPO$ fluye a la nueva posición $NM'P'O$, con cada partícula del fluido en movimiento paralelo a la placa y variando la velocidad u de modo uniforme desde cero en la placa estacionaria hasta U en la placa superior. Los experimentos muestran que, siendo constantes otras cantidades, F es directamente proporcional a A y a U e inversamente proporcional al espesor δy . En forma de ecuación

$$F = \mu \frac{AU}{\delta y} . \quad (1)$$

Donde μ es el factor de proporcionalidad e incluye el efecto del fluido en particular. Si tenemos $\tau = F/A$ como el esfuerzo cortante, entonces:

$$\tau = \mu \frac{U}{\delta y} . \quad (2)$$

La razón $U/\delta y$ es la velocidad angular de la línea NM , o es la rapidez de deformación angular del fluido, es decir, la rapidez de disminución del ángulo MNM' . Si tomamos y como la distancia a la placa inferior, la velocidad angular también se puede escribir du/dy , ya que U/t y du/dy expresan la velocidad de cambio dividida por la distancia sobre la cual ocurre el cambio. Sin embargo, du/dy es más general, ya que es válida para situaciones en las que la velocidad angular y el esfuerzo cortante cambian con y . El gradiente de velocidad du/dy también se puede visualizar como la rapidez con la que una capa se mueve en relación con una capa adyacente. En forma diferencial, la ecuación

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} , \quad (3)$$

(Ley de viscosidad de Newton)

es la relación entre el esfuerzo cortante y la rapidez de la deformación angular para el flujo unidimensional de un fluido. El factor de proporcionalidad μ se denomina viscosidad del fluido. Dicho de manera más general, la viscosidad nos indica la resistencia de un fluido a fluir. Se puede representar de dos maneras diferentes:

VISCOSIDAD ABSOLUTA μ

VISCOSIDAD CINEMÁTICA $\nu = \mu / \rho$ (4)

Por lo general, la viscosidad de los gases, al contrario de los líquidos, aumenta con la temperatura. En la siguiente gráfica se puede ver como la viscosidad del agua disminuye considerablemente con el aumento de la temperatura. La viscosidad del aire en cambio aumenta, aunque de manera despreciable. Por tanto, como este proyecto se centra en el aire como fluido base, consideraremos su viscosidad constante.

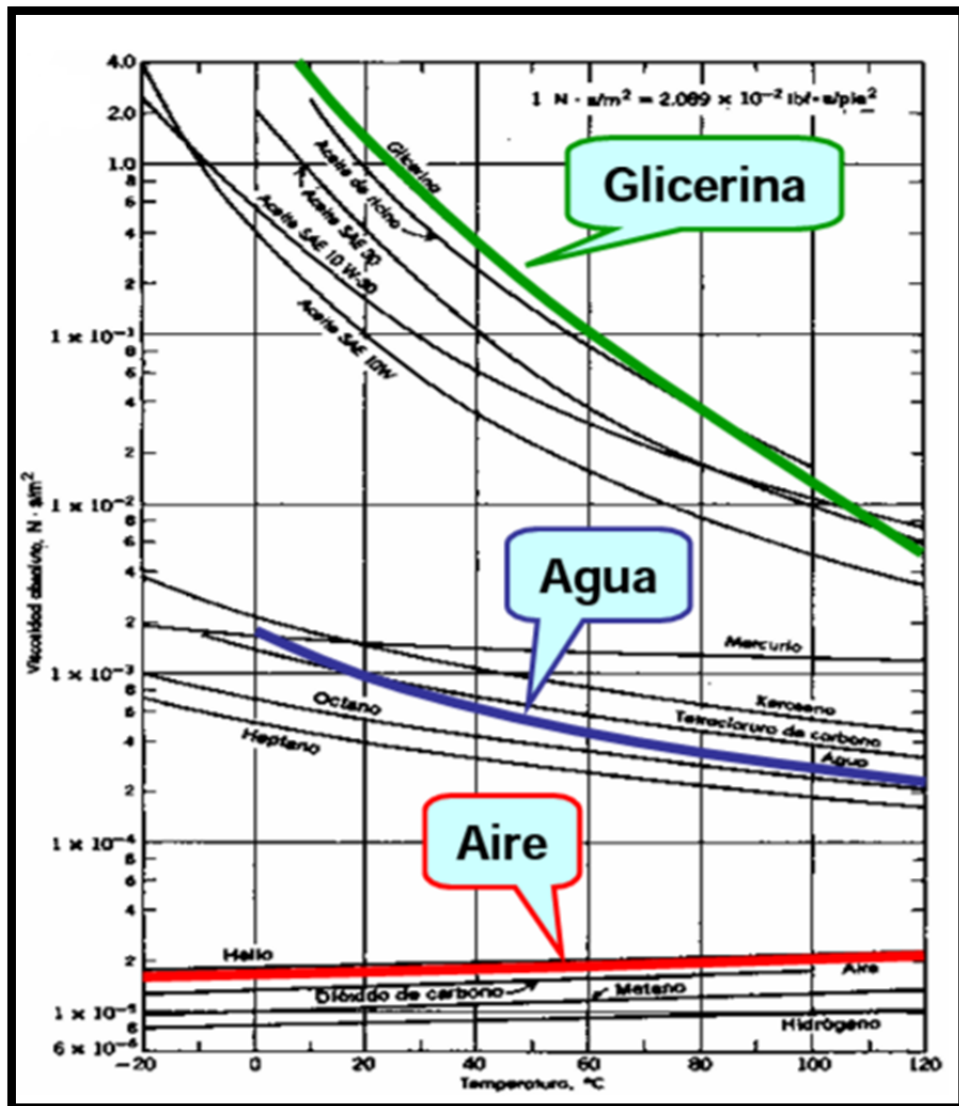


Figura 5.3: Variación de viscosidad frente a la T° .

Los fluidos se clasifican en newtonianos o no newtonianos. En el flujo newtoniano hay una relación lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante aplicado y la rapidez de deformación resultante (μ constante en la ley de viscosidad de Newton), como se muestra en la figura 5.3. En el fluido no newtoniano hay una relación no lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante aplicado y la rapidez de deformación angular. Los gases y líquidos delgados tienden a ser fluidos newtonianos, mientras que los hidrocarburos espesos de cadena larga pueden ser no newtonianos.

Durante el análisis el fluido se considerará ideal. El *fluido ideal* se supone no viscoso e incompresible.

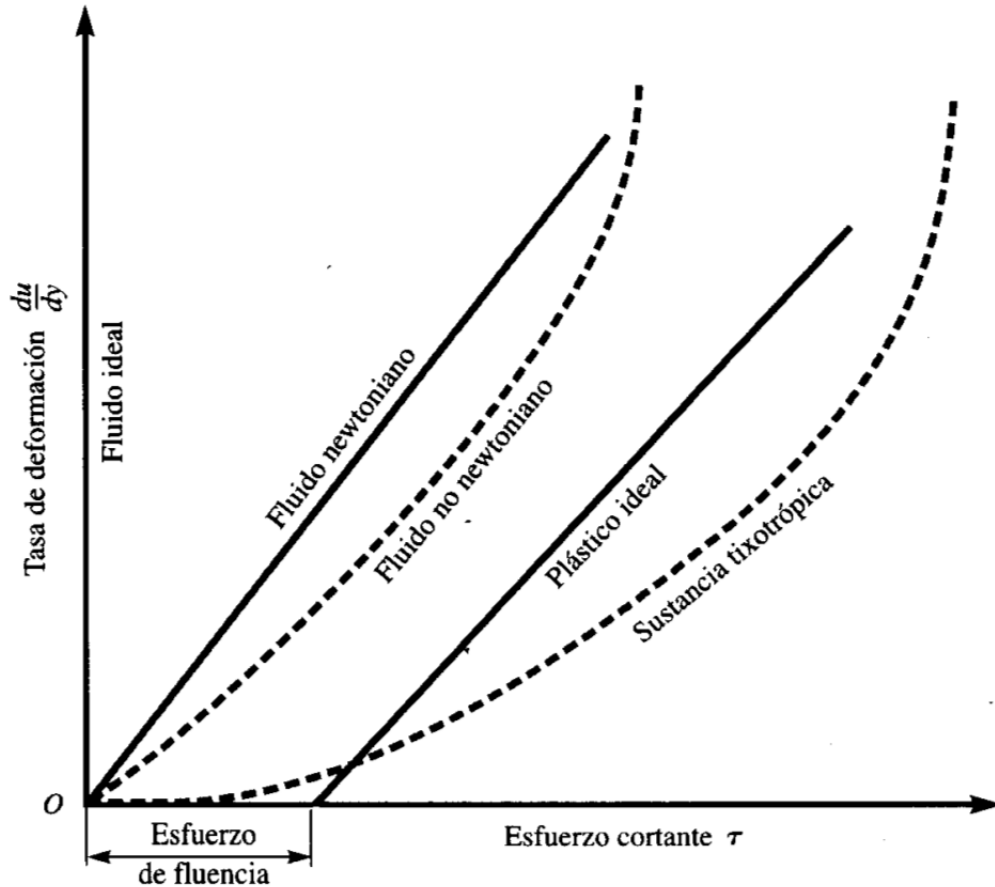


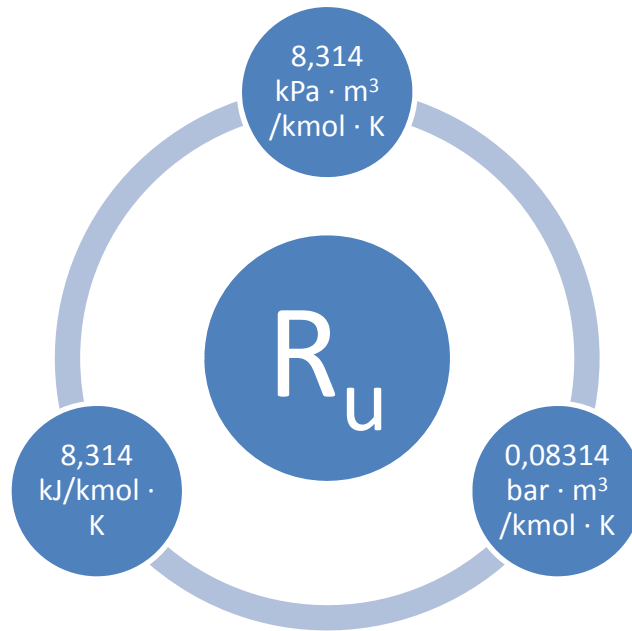
Figura 5.4: Diagrama reológico de fluidos.

5.1.2 Ecuaciones de estado

Las *Ecuaciones de Estado* relacionan las cuatro variables termodinámicas entre sí. Estas variables son: la presión, la temperatura, el volumen y la masa. Ante cualquier variación de temperatura o presión atmosférica, la densidad, viscosidad y demás variables, hacen justamente eso: variar. Existen innumerables ecuaciones de estado. Una o más, para cada problema, contexto o aplicación. Aquí no se pretende enumerar todas ellas, sino mostrar que existe infinidad de ecuaciones lo que nos permite usar la que mejor se encuadre a nuestros datos o problema e incluso para determinados rangos de temperatura, de presión, etc. La más sencilla y por tanto la más utilizada, es la ya conocida como la de los *gases ideales*:

$$PV = NR_u T \quad (5)$$

El valor de R_u (constante universal de los gases ideales) puede determinarse experimentalmente y su valor en varios conjuntos de unidades son:

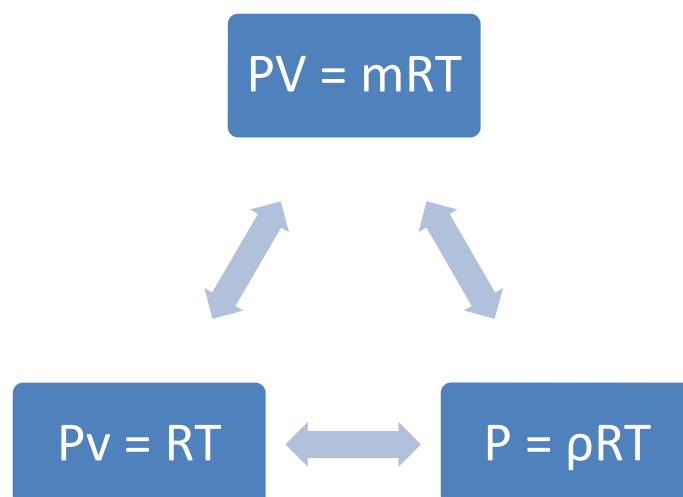


No se puede modificar una de estas variables sin que afecte al resto. Todos los gases a altas temperaturas y bajas presiones siguen muy bien la *ley de los gases perfectos*.

La ecuación de los gases ideales se utiliza con frecuencia con unidades de masa como el kilogramo, en lugar del kmol. En estos casos, en la ecuación del gas ideal se emplea una *constante específica del gas* R en lugar del valor universal R_u . Recuerdese que la masa de un mol de una sustancia recibe el nombre de *masa molar* M . De esto se obtiene que las constantes universal y específica del gas están relacionadas por:

$$R \equiv \frac{R_u}{M} \quad (6)$$

Como R depende de la masa molar de la sustancia, su valor es diferente para cada una, incluso si se expresa en las mismas unidades. Las expresiones equivalentes de la ecuación del gas ideal en base masa son:



donde v es el volumen específico, ρ la densidad y m es la masa del sistema.

También hay otras *Ecuaciones de Estado*, clasificadas según alturas con respecto al nivel del mar:

Altura < 11000m	$p = P_0 * \left(1 - \frac{b * h}{a}\right)^{\frac{g * P_0 * T_0}{P_0 * b}}$ $p = 1013.25 * (1 - 2.25577 * 10^{-5} * h)^{5.25588}$
11000m < Altura < 20000m	$p = P_{11} * e^{\frac{\rho_{11} * g * (h - 11000)}{P_{11}}}$ $p = 226.3203 * e^{-1.57688 * 10^{-4} * (h - 11000)}$
20000m < Altura < 32000m	$p = P_{20} * \left(1 + \frac{b * (h - 20000)}{T_{20}}\right)^{\frac{-P_{20} * g * T_{20}}{P_{20} * b}}$ $p = 54.749 * (1 + 4.61574 * 10^{-6} * (h - 20000))^{-34.16326}$
32000m < Altura	$p = P_{32} * \left(1 + \frac{b * (h - 32000)}{T_{32}}\right)^{\frac{-P_{32} * g * T_{32}}{P_{32} * b}}$ $p = 8.680157 * (1 + 1.224579 * 10^{-5} * (h - 32000))^{-12.203121}$

T_0	Temperatura a 0 m (288.15°K)
T_{11}	Temperatura a 11000 m
T_{20}	Temperatura a 20000 m
T_{32}	Temperatura a 32000 m
a	Temperatura a nivel del mar
b	Disminución de temperatura por m de altura: 0 - 11000m - 0.0065°K/m 11000 - 20000m - 0.001°K/m 20000 - 32000m - 0.0028°K/m
g	9.80665 m/s²
ρ_{00}	Densidad del aire a 0 m (1.225 kg/m³)
P_0	Presión a 0 m (1013.25 hPa)

También podemos clasificarlas según su estado, pues su comportamiento es radicalmente diferente dependiendo de si son Gases o Líquidos:

Líquidos:

$$\mu(T) = \mu_0 \exp \left[C \left(\frac{293 \text{ } ^\circ\text{C}}{273 \text{ } ^\circ\text{C} + T} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

Donde μ es la viscosidad en kg/(m/s), T es la temperatura en °C, μ_0 es la viscosidad a 20°C, y C es un parámetro sin unidades. μ_0 y C están determinadas por comparación experimental y son diferentes para cada líquido. El agua es la única excepción a esta ecuación, y sigue la siguiente ecuación:

$$\mu(T) = \mu_0 [7,003 Z^2(T) - 5,306 Z(T) - 1,704] \quad (8)$$

$$Z(T) = \frac{273 \text{ } ^\circ\text{C}}{273 \text{ } ^\circ\text{C} + T} \quad (9)$$

Donde $\mu_0 = 1,788 \text{ E-3 kg/ (m/s)}$

Gases:

Para $250\text{ K} \leq T \leq 1000\text{ K}$

$$\mu(T) = \mu_0 \left[\frac{T}{293\text{ K}} \right]^n \quad (10)$$

$$\rho(T) = a - bT \quad (11)$$

Donde a está en kg/m^3 y b $\text{kg}/(\text{m}^3/^\circ\text{C})$ y están determinados por comparación experimental. El agua sigue siendo la excepción a esta norma, y es:

$$\rho(T) = a - b|T - 4^\circ\text{C}|^{1,7}. \quad (12)$$

Donde $a = 1000\text{ kg/m}^3$ y $b = 0,0178\text{ kg}/(\text{m}^3/^\circ\text{C})$

También podemos basarnos en las ecuaciones anteriores para hallar nuestras propias relaciones de estado. Pero para este proyecto en concreto sabemos que vamos a trabajar en unas condiciones específicas. Hay un “único” gas con el que vamos a tratar, que es el aire. La constante específica de este gas es: $R_{\text{aire}} = 0,287\text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K}$

También se va a situar en un marco de atmosfera estándar, por tanto como la presión atmosférica varía a con la altitud podemos obtener una tabla con los valores de las diferentes variables según la altitud y tomarla como referencia estándar.

ATMÓSFERA ESTÁNDAR (simplificada)			
Altitud(m)	Temperatura (°C)	Presión Hpa	Densidad (kg/m³)
0	15	1013,2	1,23
500	11,8	955	1,17
1000	8,5	899	1,11
1500	5,2	845	1,06
2000	2	795	1,01
2500	-1,2	747	0,96
3000	-4,5	701	0,91
3500	-7,8	657	0,86
4000	-11	616	0,82
4500	-14,2	577	0,78
5000	-17,5	540	0,74
5500	-20,8	505	0,7
6000	-24	472	0,66
7000	-30,5	410	0,59
8000	-37	356	0,53
9000	-43,5	307	0,47
10000	-50	264	0,47
10769	-55	234,5	0,37
15000	-55	121	0,19
20000	-55	55	0,09
30000	-55	5	0,01
40000	-3,7	2	0

Figura 5.5: Tabla simplificada de Atmosfera Estándar.

Los análisis aerodinámicos se realizarán en cotas bajas, concretamente a una altitud genérica a nivel del mar, puesto que las motos competirán en distintos circuitos de España.

5.1.3 El principio de Bernoulli y el principio de Venturi

Uno de los principios más importantes en la mecánica de fluidos como en la aerodinámica de competición es el *Principio de Bernoulli*.

El fenómeno que se intenta explicar es aquel que se produce cuando cierta sección de paso de un flujo, se reduce o amplía produciéndose una aceleración o deceleración, respectivamente, del flujo, así como una reducción o aumento de la presión.

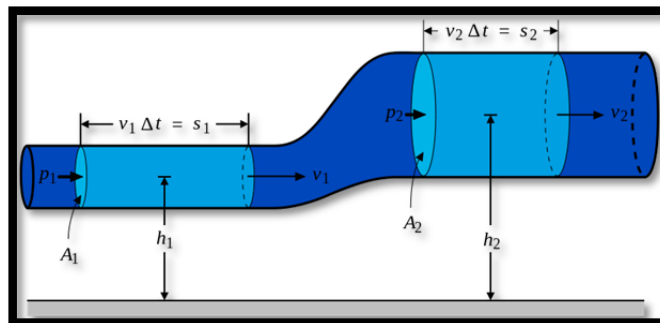


Figura 5.6: Principio de Bernoulli en un estrechamiento.

La ecuación que explica este fenómeno es la siguiente, en la que se expresa de forma matemática, que la energía de flujo (debida a la presión), más la energía cinética (debida a la velocidad), más la energía potencial gravitacional (debida a la altitud), siempre es constante:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gy = \text{constante} \quad (13)$$

Observando la expresión matemática con atención, se puede deducir que efectivamente:

Si la altura y es la misma en cada instante y si la presión aumenta, la velocidad ha de descender y viceversa.

Lo mismo ocurre con el área o sección de paso:

$$\text{Caudal} = \text{velocidad} \cdot \text{área} \quad (14)$$

de aquí se deduce que si el área aumenta la velocidad decrece.

Con estas dos relaciones, ya tenemos lo que buscamos el llamado *Principio de Venturi*. Éste no es más que una forma diferente de expresar el Principio de Bernoulli:

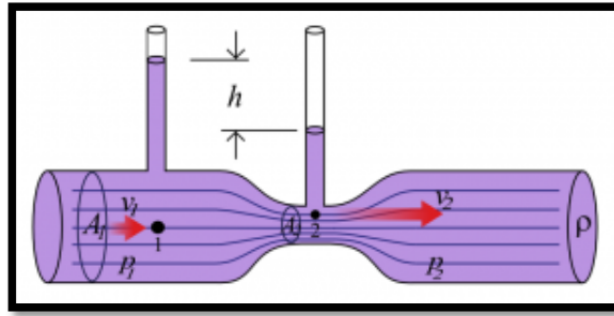


Figura 5.7: Principio de Venturi.

El teorema de Bernoulli explica, entre otras cosas, la fuerza de sustentación que actúa sobre el ala de un avión en vuelo. Un ala, o perfil aerodinámico, está diseñada de forma que el aire fluya más rápidamente sobre el extradós (superficie superior del ala) que sobre el intradós (superficie inferior), lo que provoca una disminución de presión en el extradós con respecto al intradós. Esta diferencia de presiones proporciona una fuerza de sustentación que mantiene el avión en vuelo.

Las consecuencias de este principio, se pueden observar en multitud de elementos o zonas de un coche de carreras. Los coches de carrera son de perfil muy bajo con el fin de que el aire se desplace a gran velocidad por el estrecho espacio entre la carrocería y el suelo. Este efecto, llamado *efecto suelo*, reduce la presión debajo del vehículo y lo atrae con fuerza hacia abajo, lo que mejora el agarre. Estos coches también llevan en su parte trasera un alerón, que en definitiva es un plano aerodinámico con forma de ala invertida que sirve para aumentar la fuerza que ejerce contra el suelo para poder así tener mayor agarre en curva.

Cuando un cuerpo se mueve a través de un fluido, se crea en la parte frontal un aumento de presión a la vez que se genera en la parte posterior una disminución de presión. Esta diferencia de presiones implica que aparezca en el cuerpo una fuerza contraria al avance de este. Esta resistencia debido al componente de presión contribuye a aumentar la resistencia total. Cuanto mayor es la velocidad del objeto, más aumenta este efecto. Por tanto, tanto en el mundo automovilístico, tanto comercial como de competición, es muy importante buscar un perfil lo más aerodinámico posible. Con esto se pretende reducir la depresión en la parte trasera y reducir así la fuerza de arrastre. De esta manera se podrá alcanzar un menor consumo de combustible o una mayor velocidad punta.

5.1.4 Flujo laminar y turbulento

El *flujo laminar* se define como aquel en el que el fluido se mueve en capas o láminas, deslizándose suavemente una capa sobre otra capa adyacente con sólo un intercambio molecular de cantidad de movimiento, es decir, unas capas se deslizan unas sobre otras sin mezclarse. Cualquiera que sea la tendencia hacia la inestabilidad y la turbulencia, se amortigua por fuerzas cortantes viscosas que resisten el movimiento relativo de las capas adyacentes. Sin embargo, en el *flujo turbulento*, las partículas se mueven de forma errática, con un intercambio de cantidad de movimiento transversal muy violento. Es decir, se mueven de forma inestable mezclándose entre sí. La naturaleza del flujo laminar o turbulento, y su posición relativa sobre una escala que indica la importancia relativa de las tendencias de turbulento a laminar, son indicadas por el *número de Reynolds*.

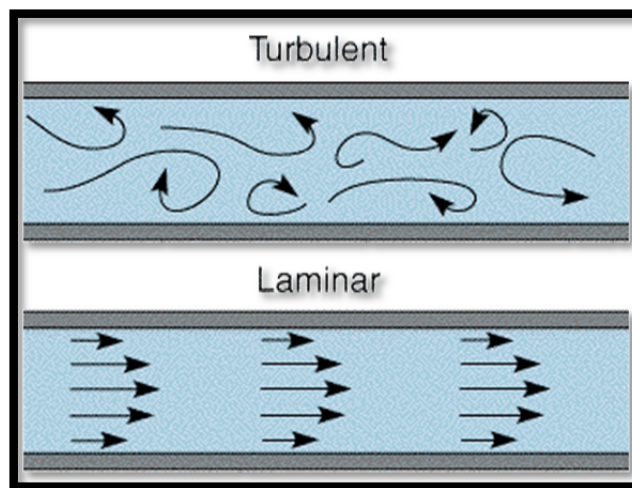


Figura 5.8: Régimen laminar y turbulento.

5.1.5 Número de Reynolds

Reynolds pudo comprobar que a partir de un cierto valor de velocidad, distinto para cada tubo y para cada líquido, era imposible mantener el régimen laminar.

El número de Reynolds es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos para caracterizar el movimiento de un fluido. Como todo número adimensional es un cociente, una comparación. En este caso es la razón de las fuerzas inerciales a las fuerzas viscosas:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} \quad \text{ó} \quad Re = \frac{D v_s}{\nu} \quad (15)$$

Dónde:

ρ : densidad del fluido

v_s : velocidad característica del fluido

D : Diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido o longitud característica del sistema

μ : viscosidad dinámica del fluido

ν : viscosidad cinemática del fluido
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (16)$$

Un número crítico de Reynolds hace distinción entre regímenes de flujo, tales como flujo laminar o turbulento en tubos, en la capa límite, o alrededor de objetos sumergidos. El valor particular depende de la situación. Valores muy pequeños indican movimiento *lento* y *viscoso*, donde los efectos de la inercia son despreciables. Valores moderados de Re corresponden al flujo *laminar*, caracterizado por variaciones suaves. Valores altos de Re suelen estar asociados al flujo *turbulento*. Los valores numéricos del número de Reynolds correspondientes a cada caso dependen de la geometría del flujo. En flujos alrededor de cuerpos, como es nuestro caso, normalmente se toman estos valores como referencia:

- Laminar: $10^3 < Re < 10^6$
- Turbulento: $10^6 < Re$

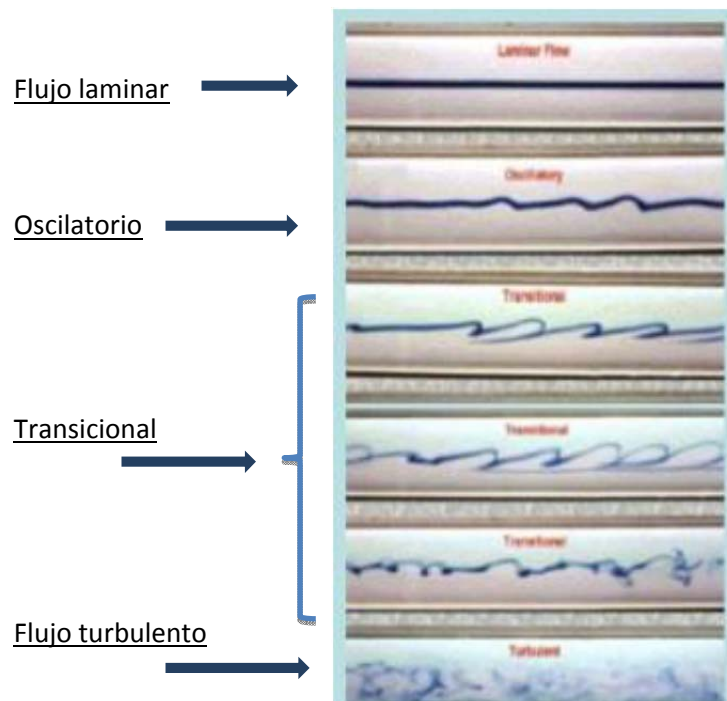


Figura 5.9: Transición de flujo laminar a flujo turbulento.

5.2 Aerodinámica de motocicletas

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que estudia las fuerzas que aparecen sobre los cuerpos sólidos cuando existe un movimiento relativo entre estos y el fluido que los baña, siendo éste último un gas y no un líquido. Si se tratase de un líquido se trataría de la hidrodinámica.

El estudio aerodinámico enmarca principalmente corrientes externas, aunque también sirve para estudiar cualquier tipo de corriente interna como puede ser el flujo en conductos. El conocimiento de la carga aerodinámica es fundamental para el diseño en muchas aplicaciones de ingeniería como la aviación, eólica, automoción, estructuras, etc.

En nuestro caso, el tamaño y la forma de la motocicleta, junto con cualquier complemento aerodinámico como un carenado o una cúpula, entre otras cosas, entre las que se incluye al propio piloto, afecta a su resistencia aerodinámica y a su sustentación, y por lo tanto también a su consumo de potencia. Éste consumo será mayor cuanto mayor sea la velocidad.

En las motos, al igual que en el resto de vehículos que se mueven a velocidades medias/altas, es muy importante estudiar los efectos que la presión del viento tiene tanto en la estabilidad como en la capacidad de control del vehículo. Sin embargo, este tema es mucho más complejo en las motocicletas, ya que si se comparan con otros vehículos como los automóviles, se aprecian diferencias bastante pronunciadas.

Por lo general el diseño de los carenados de muchas motocicletas de carretera o incluso de competición, está poco estudiado. Muchos ingenieros centran su atención en la parte frontal y descuidan el diseño de la parte trasera. En las motocicletas de carretera, los diseñadores suelen copiar los diseños de las de competición, o piensan sólo en la estética o en proteger al piloto de los problemas meteorológicos que pueda surgir.

Este proyecto únicamente se centra en algunos factores elementales relacionados con la resistencia aerodinámica y en el estudio de algunos de los aspectos aerodinámicos que son más importantes para las motocicletas, entre los que se encuentra el estudio de la estela posterior.

5.2.1 Resistencia aerodinámica

En primer lugar, se va a ver por qué se produce la resistencia aerodinámica, dado que es en lo que más potencia se malgasta, a no ser que circulemos a muy baja velocidad. Cuando una motocicleta circula con cierta velocidad a través del aire, aparecen unas fuerzas de rozamiento que intentan impedir este movimiento. Estas fuerzas se generan debido a que existe una diferencia de presiones entre las partes delantera y trasera de la motocicleta. Esta diferencia de presiones crea en el área frontal de la moto una fuerza de resistencia aerodinámica, y por este motivo cuanto mayor es el área frontal de la moto, mayor es la fuerza. La viscosidad del aire es la responsable de esta fuerza de rozamiento, ya que sin esa

viscosidad, la forma del objeto no afectaría a la resistencia aerodinámica independientemente de la velocidad de éste.

El teorema de Bernoulli establece que la presión total del flujo de gas que circula alrededor de un cuerpo se compone de dos partes, la primera es la presión estática (p) y la segunda es la presión dinámica ($\frac{1}{2} \cdot v^2$) debida a su velocidad longitudinal. La presión total ($p_0 = p + \frac{1}{2} \cdot v^2$) permanece constante, por lo tanto si se aumenta la velocidad del gas, su presión dinámica aumenta y su presión estática disminuye. Cuando el aire se encuentra con un objeto móvil como una motocicleta, comienza a aumentar y a disminuir su velocidad conforme se va encontrando con las distintas formas, y por lo tanto la presión que se crea en las distintas zonas de la moto va variando de un lugar a otro. Al sumar todas las componentes individuales de la presión del aire a lo largo de toda la moto, la fuerza resultante nos da, tanto la fuerza de resistencia aerodinámica, como la fuerza de sustentación.

Sin embargo, al usar las leyes clásicas de la física, con lo que se llama un “gas ideal”, tendremos unos cálculos que no proporcionan ningún tipo de rozamiento. Esto se conoce como la paradoja de D’Alembert. D’Alembert aplicó la teoría de flujo potencial para modelar el fenómeno de la resistencia producida sobre un cuerpo cuando una corriente de fluido circula sobre él. Al aplicarla concluyó que la fuerza resultante sobre el cuerpo sobre el cual fluye el aire es cero, lo cual se contradice con la observación, ya que la experiencia nos dice que sí que existe rozamiento.

Cerca de la superficie de la moto y del piloto el aire no se comporta como un gas ideal, la viscosidad produce una fricción interna. Justo en la superficie la velocidad del aire es igual a la de la moto y la fricción interna del gas tiende a arrastrar con él a las capas adyacentes de aire. Conforme nos alejamos de la superficie, el aire se ve menos afectado, por lo que se puede deducir que cerca de la superficie existe una capa de aire relativamente fina que tiene un elevado gradiente de velocidad. Dicho de otra forma, en la superficie de la moto la velocidad de las partículas de aire es la misma que la del vehículo, y a medida que nos alejamos de esta capa, la velocidad de las partículas es la del aire circundante. Esta capa se conoce como capa límite y su comportamiento tiene una gran importancia en las propiedades aerodinámicas del vehículo.

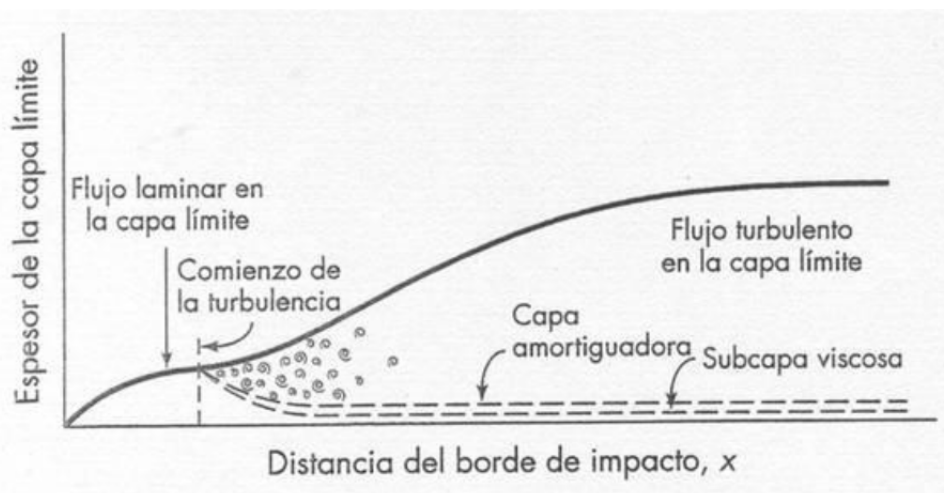


Figura 5.8: Perfiles del campo de velocidades en la capa límite (flujo en placa plana).

Cuando el flujo de aire local que está alrededor de un cuerpo es lento (ya sea porque el vehículo se mueve lentamente o ya sea debido a la forma del objeto), el gradiente de velocidad es pequeño y las capas adyacentes que están dentro de la capa límite deslizan unas sobre otras de forma ordenada, esto, como ya hemos explicado en el apartado de fluidos, es lo que se llama flujo laminar. Sin embargo, cuando las velocidades locales son elevadas, el gradiente de velocidad también lo es y el rozamiento entre las distintas capas hace que unas salten sobre las otras creando remolinos. Este tipo de flujo se llama turbulento. A no ser que la velocidad sea muy baja, tendremos una mezcla de flujo laminar y turbulento sobre el vehículo que está en movimiento.

Se han sugerido varias definiciones para el espesor de la capa límite δ . Estas son una de las posibilidades respecto al eje x:

$$\text{Laminar: } \frac{\delta}{x} = \frac{5.0}{\sqrt{Re_x}} \quad (17)$$

$$\text{Turbulenta: } \frac{\delta}{x} = \frac{0.385}{Re_x^{0.2}} \quad (18)$$

Hablando de forma general, los vehículos suelen tener una parte delantera que hace que la única posibilidad que normalmente tiene el aire es la de seguir las formas del objeto hasta llegar a la zona donde está la sección más ancha del vehículo, a partir de este punto la capa límite se hace más gruesa y cuando la forma del cuerpo se aleja mucho de lo que sería ideal, el aire ya no puede seguir pegado al contorno y la capa límite se separa del vehículo. A esto se le llama desprendimiento de la capa límite. El objeto que se mueve a través del aire deja una estela turbulenta detrás de él. El tamaño, la forma del objeto y su velocidad son los factores que influyen en mayor medida en la forma de esta estela.

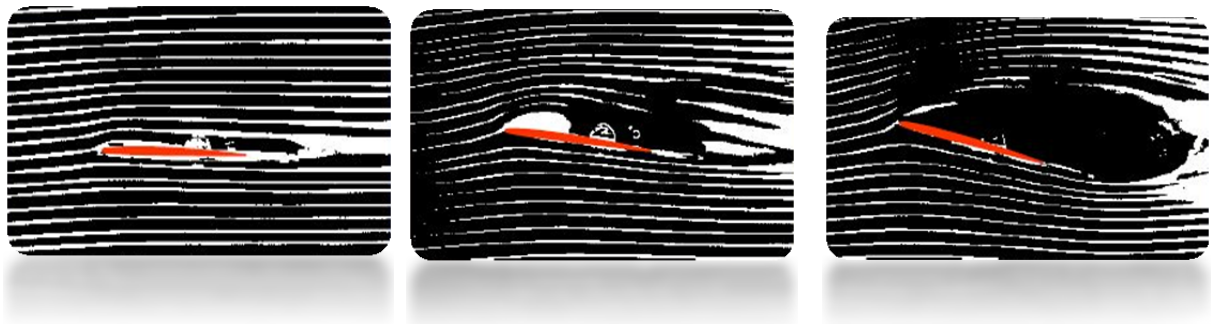


Figura 5.9: Desprendimiento de la capa límite en un perfil de ala.

Así pues, la viscosidad produce un cambio en la distribución de presión alrededor del vehículo y si sumamos las componentes de la presión, tendremos un efecto resultante que da lugar a fuerzas de rozamiento y de sustentación. Así es cómo, brevemente explicado, la viscosidad produce la mayor parte de la resistencia aerodinámica. La viscosidad también produce otro efecto más directo, conocido como resistencia viscosa. Para empujar a un cuerpo a través de un fluido viscoso debemos proporcionar una fuerza de cortadura que haga que las capas adyacentes se corten o deslicen unas sobre otras. Esta fuerza también actúa haciendo que el vehículo vaya más lento y por lo tanto este es un efecto que hay que sumar a la fuerza de resistencia aerodinámica previamente descrita. En un vehículo normal de carretera esta resistencia superficial supone sólo una pequeña parte de la fuerza de resistencia aerodinámica total.

El punto en el que la capa límite se separa del cuerpo se conoce como punto de desprendimiento. Normalmente nos interesa diseñar el carenado de forma que este punto esté lo más retrasado posible, y también que la sección en ese punto sea lo más pequeña posible, para reducir así el tamaño de la estela. En ocasiones es de utilidad que la capa límite sea turbulenta. En algunas condiciones, se opta por perfiles que generan una capa límite turbulenta, ya que ésta permanece adherida al perfil más tiempo que la capa límite laminar. Con esto evitamos que el punto de separación de la estela se adelante o que surja el desprendimiento de la capa límite. El aire prefiere no cambiar de dirección de forma rápida y para prevenir la separación debemos evitar reducciones bruscas de la sección transversal conforme nos vamos moviendo hacia atrás, de esta forma llegamos a la típica forma de lágrima, larga y fina, que produce una resistencia aerodinámica muy baja.

La relación entre la longitud y la anchura que se necesita para tener la menor resistencia aerodinámica, nos proporcionaría una motocicleta demasiado larga. Si acortamos el carenado dándole a la parte trasera un ángulo mayor, sólo conseguiremos que el aire se separe más pronto, con lo que tendremos una estela más grande y una mayor resistencia aerodinámica. Es mejor diseñar un carenado más largo y después cortarlo recto por la parte trasera, dejándolo a la longitud que necesitamos, el punto ideal para cortar es el punto de separación. Por detrás de ese punto la forma tiene menos importancia y por lo tanto la ausencia de carenado es menos importante. Esto se conoce como “cola Kamm”.

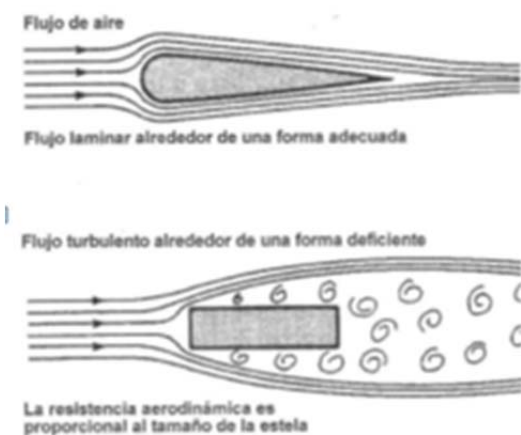
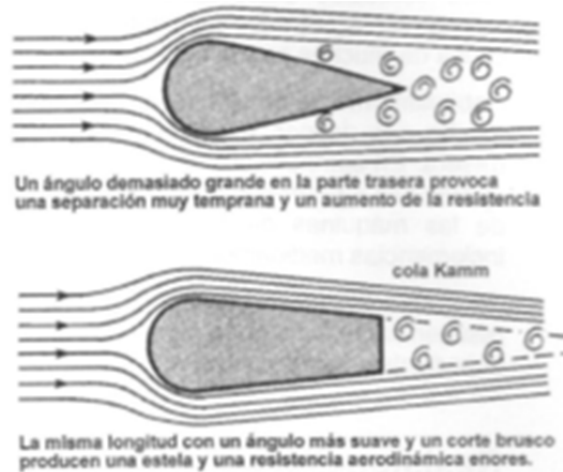


Figura 5.10.a: Si la parte trasera tiene un ángulo suave, lo cual sólo es posible con un objeto largo y fino, es más fácil que el aire siga la forma del objeto, de forma que el tamaño de la estela sea pequeño. Una forma aerodinámicamente pobre hace que el aire se separe pronto y que se produzca una estela larga y una elevada resistencia aerodinámica.

Figura 5.10.b: Una forma de lagrima con un ángulo trasero demasiado grande también permite que el aire se separe demasiado pronto, dando lugar a una gran estela y un rozamiento elevado.



Sin embargo, si utilizamos un ángulo más suave y cortamos el extremo (lo que se conoce como “cola de Kamm”), podemos mantener la misma longitud retrasando el punto de separación y disminuyendo la sección en ese punto, de forma que se produzca una menor estela y un menos rozamiento.

Aun utilizando una “cola Kamm”, es difícil carenar de forma eficiente una moto debido a las diferentes formas que se necesitan para acomodar al piloto. Sin embargo se pueden hacer mejoras. Contrariamente a lo que se suele pensar, el lugar por el que hay que empezar es la parte trasera de la moto, ya que el flujo alrededor de las zonas de alta presión de la parte delantera normalmente se comporta razonablemente bien por sí solo y mejorarlo sólo supondría suavizar las líneas, pero cualquier modificación que suavice el flujo en la parte trasera y que ayude a reducir el tamaño de la estela, supondrá un beneficio real. De hecho muchos frontales muy afilados producirían menos rozamiento si se les diera la vuelta. Las máquinas diseñadas para conseguir records de velocidad no sólo tienen la menor área frontal posible, también tienen un carenado que se extiende más allá de la rueda trasera.



Figura 5.11: Diferentes motos usadas para batir los record de velocidad.

La fuerza aerodinámica real es proporcional al área frontal del vehículo, por lo que si multiplicamos por dos el área, multiplicamos también por dos la resistencia aerodinámica y la potencia necesaria. Sin embargo, el efecto de la velocidad en la resistencia aerodinámica sigue una ley cuadrática, esto es, si duplicamos la velocidad del aire, multiplicamos por cuatro la resistencia aerodinámica. El efecto de la velocidad sobre la potencia es todavía más drástico, es proporcional a la tercera potencia de la velocidad del aire y por lo tanto necesitamos incrementar ocho veces la potencia cuando duplicamos la velocidad.

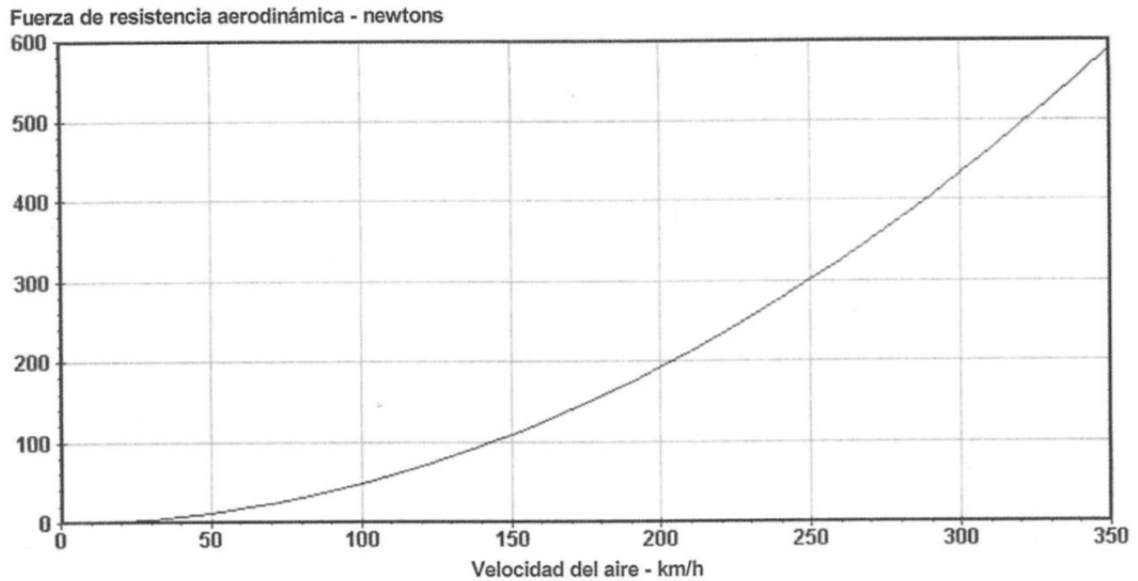


Figura 5.12: Fuerza de resistencia aerodinámica en función de la velocidad del aire.

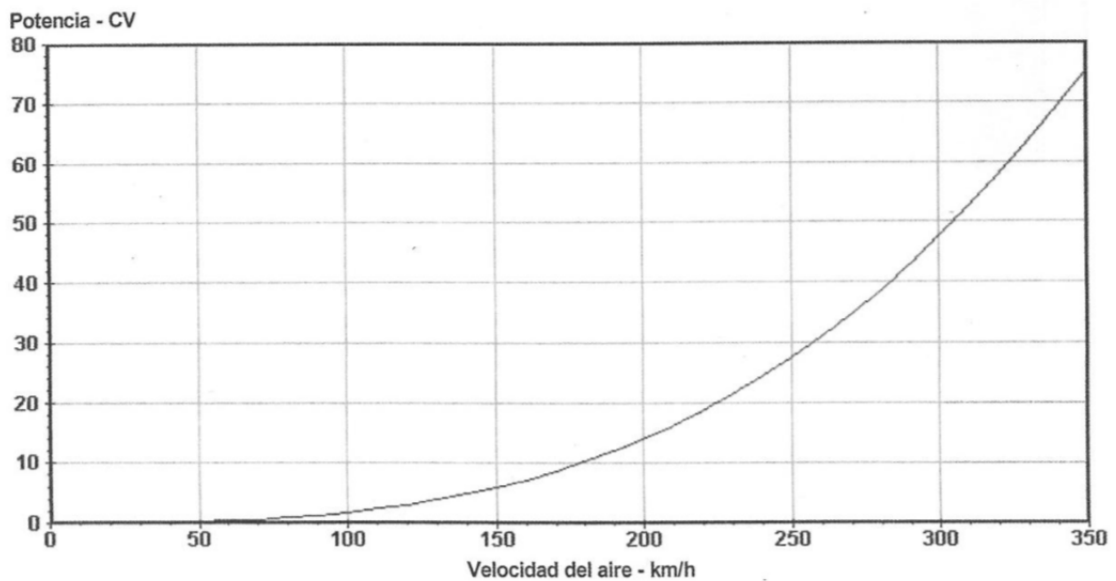


Figura 5.13: Potencia necesaria en función de la velocidad del aire.

En la figura podemos ver cómo varían en función de la velocidad del aire (hasta llegar a los 350 km/h) la fuerza de resistencia aerodinámica y la potencia que se necesita para superar las fuerzas aerodinámicas. La velocidad del aire debe incluir cualquier efecto del viento existente tanto si es frontal como si es de cola. Estas curvas se han dibujado para un área frontal de 1000 cm² y un $C_D = 1.0$. Por lo tanto para obtener la fuerza de resistencia aerodinámica o la potencia necesaria para una motocicleta real, debemos multiplicar los valores de la gráfica por el C_D y el área frontal real del vehículo en particular.

Para poder comparar numéricamente las cualidades aerodinámicas de objetos de distintas formas, se utiliza un parámetro adimensional llamado C_D . A menudo se dice incorrectamente que si empujamos una chapa plana a través del aire, su C_D es igual a 1.0. Esto se refiere solamente a un caso teórico especial, cuando todo el aire que llega a la chapa rebota contra la misma. Para comparar la resistencia aerodinámica de varios cuerpos necesitamos multiplicar el C_D por el área frontal, esto se conoce como C_{DA} y sus unidades son las que se hayan utilizado para medir el área.

Mientras que el valor de C_D es útil para comparar las cualidades aerodinámicas relativas de objetos con distintas formas, no nos sirve para comparar diferentes motos. El C_D ignora el otro ingrediente fundamental de la resistencia aerodinámica, el área frontal. La siguiente tabla muestra el valor del C_D multiplicado por el área. Este parámetro es conocido como C_{DA} y es la mejor forma de comparar las cualidades aerodinámicas de las diversas motos.

Motocicleta	Piloto tumbado	Piloto sentado
Yamaha Venture		0,75
Honda V65 Magna		0,61
Honda Blackbird	0,44 / 0,49	0,72 / 0,81
Honda VF1000F	0,40	0,46 / 0,45
Aprilia Mille	0,52	0,61
Ducati 916	0,49 / 0,57 / 0,53	0,61 / 0,69 / 0,61
BMW R1100 RT	0,53	0,97
BMW K100RS	0,40	0,43
Yamaha R1 (1998)	0,57	0,62
Yamaha FJ1100	0,43	0,48
Kawasaki GPZ900R	0,36	0,43
Suzuki GSX 1100EF	0,41	0,44
Suzuki GSXR750	0,32	
Suzuki Hayabusa	0,31	
Kawasaki ZX-12R	0,34	
Yamaha OW69	0,32	
Honda 1996 RS 125	0,20	
Honda 1990 RS 125	0,19	
Honda RS500	0,24	
Rifle faired Yamaha	0,15	

Los valores múltiples en la tabla indican que los datos para esa máquina se han obtenido de varias fuentes distintas. La última máquina de la lista estaba preparada especialmente para una competición de bajo consumo de combustible.

Cuanto más bajo es el valor de C_{DA} , menor será la potencia necesaria para alcanzar una velocidad determinada. Estos datos se han recopilado utilizando diversas fuentes y deben considerarse únicamente como una guía porque pueden existir variaciones entre las medidas hechas en distintas instalaciones. Por ejemplo, el tamaño del piloto y su ropa pueden ser diferentes.

5.2.2 Flujo de aire interno

Las necesidades del motor también complican el asunto, y los requerimientos actuales incrementan inevitablemente la resistencia aerodinámica. Cualquier moto necesita un suministro de aire fresco para poder respirar de forma eficiente, y para refrigerar el motor. Aprovechando las altas presiones que existen en el morro de la moto se han llevado a cabo muchos intentos para presurizar levemente el aire que llega al sistema de admisión, con la intención de conseguir una sobrecarga a altas velocidades. La técnica más empleada consiste en encerrar completamente los carburadores en el interior de una gran caja llamada *airbox*, a la que llega aire fresco a través de unos tubos que provienen del morro de la moto. A una velocidad media el beneficio potencial de la sobrecarga es muy pequeño, se necesitan velocidades muy elevadas para que comience a ser significativo.

Tanto si el motor está refrigerado por aire o por agua, debemos proporcionarle un flujo de aire fresco. Los motores refrigerados por aire no nos permiten elegir a dónde debemos dirigir el aire, mientras que en los motores refrigerados por agua el radiador se puede montar en diversas posiciones para adaptarnos al espacio disponible y también en función de consideraciones aerodinámicas. La posición frontal es la más obvia y la más común, pero el paso del aire queda restringido por la horquilla. Se han buscado orientaciones alternativas con radiadores laterales o con el radiador colocado debajo del sillín.

5.2.3 Sustentación y Centro de Presiones

De la misma forma que agrupamos juntas las diversas masas de una motocicleta en un punto equivalente que llamamos Centro de Masas o Centro de Gravedad, podemos hacer lo mismo con las fuerzas aerodinámicas. Tanto si miramos de frente como si lo hacemos de lado, existirá un punto a través del cual actuará la fuerza total. Este punto se llama *Centro de Presiones* (C_{dp}). Esta fuerza resultante se puede descomponer en una componente vertical y otra horizontal. Si la moto no es simétrica lateralmente o existe algún viento lateral, entonces también existirá una componente lateral. La parte longitudinal (de adelante a atrás) de la componente horizontal representa la fuerza de resistencia aerodinámica, mientras que la componente vertical representa la fuerza de *sustentación*, que puede ser positiva o negativa, dependiendo de la dirección que tenga. Además de las fuerzas que actúan en el C_{dp} , la distribución de presión puede dar lugar a momentos. Por ejemplo, si tenemos una fuerza de

sustentación positiva (que apunta hacia arriba) en la parte delantera y otra negativa (que apunta hacia abajo) en la parte trasera, la fuerza vertical resultante será igual a cero, pero existirá un momento que intentará que la moto rote hacia atrás. Estos momentos son conocidos como momentos aerodinámicos. Normalmente, además de visualizar las fuerzas y los momentos que actúan en un punto, resulta muy útil considerar la relación que existe entre ese punto y la posición del C_{dG} . Estas fuerzas crean momentos alrededor del C_{dG} que pueden tener un gran impacto en la estabilidad dinámica.

La sustentación aerodinámica descrita anteriormente reduce la carga total sobre los neumáticos, por lo que es potencialmente peligrosa porque reduce la máxima adherencia que puede llegar a existir entre los neumáticos y la carretera.

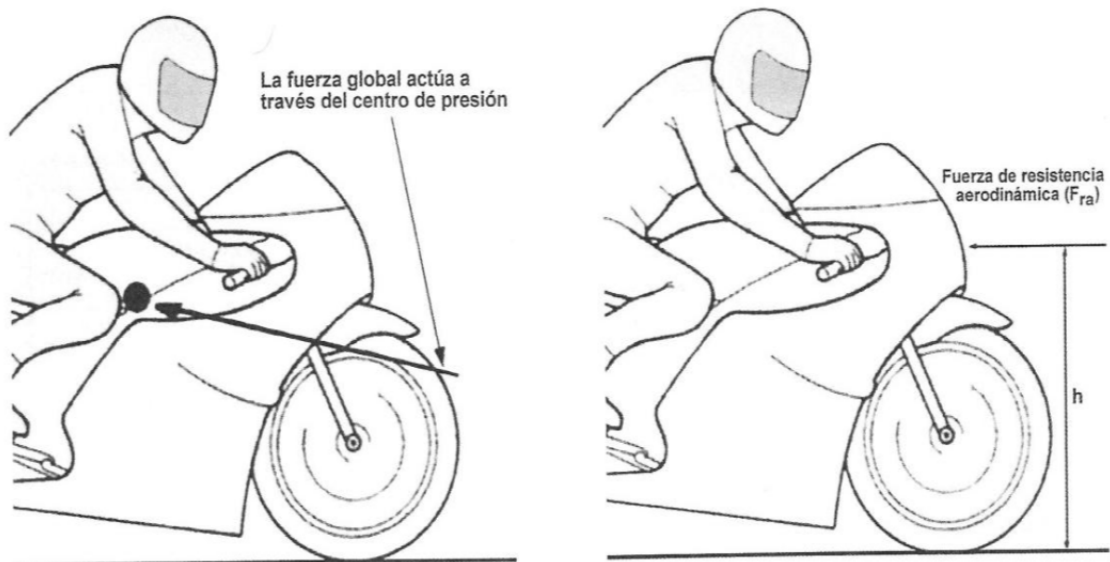


Figura 5.14: Fuerzas aerodinámicas en una moto.

La fuerza aerodinámica F_d , actúa a través del C_{dP} frontal, a una distancia h del suelo. Esto produce un momento que intenta rotar la moto hacia atrás, descargando la rueda delantera y cargando la trasera. Para tener una idea de su importancia relativa, aquí tenemos una gráfica que nos muestra la reducción de la carga en la rueda delantera que produce la resistencia aerodinámica a distintas velocidades del aire. Se muestran dos ejemplos de carga estática de la rueda. Representa a una motocicleta ficticia con un área frontal de 4000 cm^2 , un $C_D = 0.7$ y una distancia entre ejes de 1500 mm :

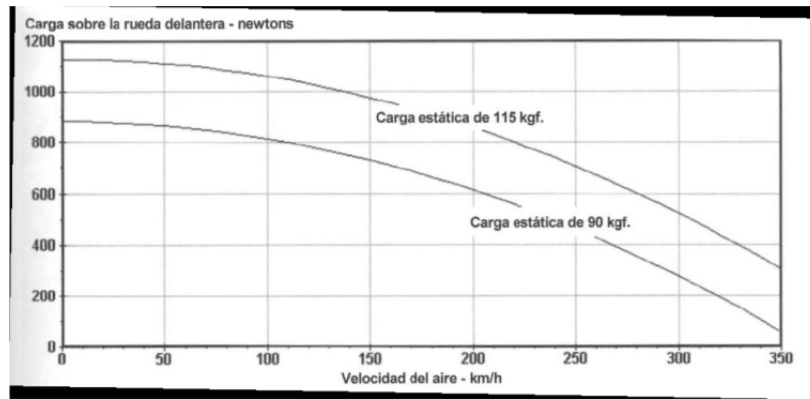


Figura 5.15: Reducción de carga en rueda delantera en función de la velocidad del aire.

Manteniendo el resto de cosas iguales, cualquier cosa que reduzca la resistencia aerodinámica y/o la altura efectiva a la que actúa, ayudará a reducir la transferencia de carga. Además de reducir la resistencia aerodinámica, la situación ideal sería utilizar un carenado con una forma tal que creara una fuerza hacia abajo (fuerza de sustentación negativa) en la parte delantera y una fuerza de sustentación positiva en la parte trasera, para equilibrar de forma exacta el efecto que acabamos de mencionar.



Figura 5.16.a: Las pequeñas aletas de esta Suzuki se diseñaron para proporcionar una fuerza hacia abajo cerca de la rueda delantera, para contrarrestar la tendencia que el tren delantero tenía al levantarse con la velocidad.

Figura 5.16.b: Ducati, en sus modelos de 2010 y 2011 de motoGP, también incluyó unas pequeñas aletas con la intención de proporcionar una mayor adherencia a la rueda delantera.



Pero el efecto de sustentación producido por la fuerza aerodinámica no es el único efecto aerodinámico que varía la carga de los neumáticos. A este efecto debemos añadir cualquier sustentación global, que reducirá la carga en ambas ruedas y cualquier momento aerodinámico de cabeceo que puede tender a cargar una rueda y descargar la otra.

Dado que los automóviles de competición consiguen un incremento brutal de su velocidad de paso por curva gracias al agarre extra que consiguen en sus neumáticos debido a las cargas aerodinámicas que a través de los alerones delanteros y traseros pegan el coche al suelo, además del “efecto suelo” del chasis, podríamos pensar que se podría explotar el mismo principio en una motocicleta. Pero debido a que las motos necesitan inclinarse para tomar las curvas, la situación es más compleja que en un coche. De hecho, un alerón fijo u otros medios que se pudieran utilizar para generar una carga aerodinámica probablemente reducirían la velocidad de paso por curva. La siguiente figura representa una moto tumbada, y muestra que la fuerza hacia abajo producida por un alerón actúa alineada con la moto y tiene dos componentes, una vertical y otra horizontal.

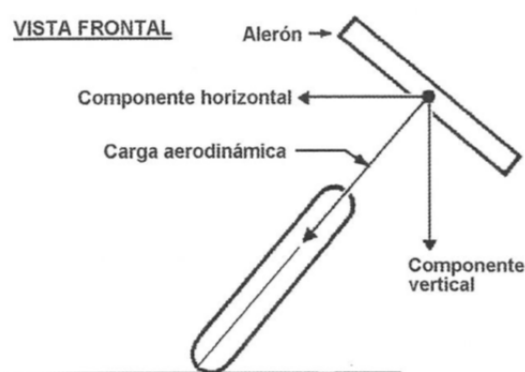
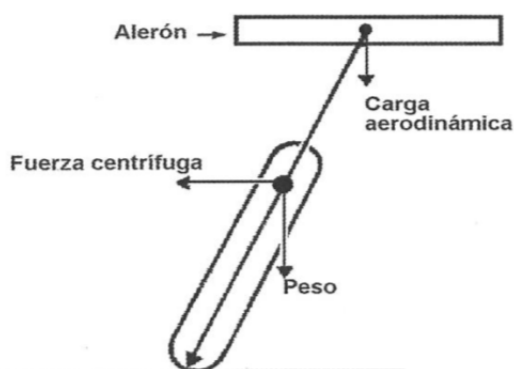


Figura 5.17: Un alerón fijo incrementa por igual las componentes vertical y horizontal que actúan sobre los neumáticos, y por lo tanto no existe ningún beneficio al tomar la curva. Lo más probable es que las cosas empeorasen.

Aunque la componente vertical se puede utilizar para incrementar la adherencia en la huella de contacto de los neumáticos, esta adherencia extra sólo contrarresta la componente horizontal añadida, y por lo tanto finalmente no existe ningún beneficio. Sin embargo, realmente la fuerza de sustentación aerodinámica puede llegar a incrementar la velocidad de paso por curva afectando a la frenada a alta velocidad, a la tracción y a la estabilidad. Si pudiéramos generar una carga aerodinámica que actuara únicamente en sentido vertical y hacia abajo (por ejemplo, mediante un alerón inclinable) se conseguiría aumentar la velocidad en frenada, aceleración y al tomar las curvas (al igual que un coche). Un interesante efecto secundario es que haría falta un ángulo de inclinación menor para tomar una curva determinada a una velocidad determinada.

Figura 5.18: En teoría, un alerón que se pudiera inclinar para mantenerse siempre horizontal, podría mejorar la frenada, la tracción y la velocidad de paso por curva.



Tal y como podemos ver en la figura, el momento debido a la carga aerodinámica ayuda a contrarrestar el momento de la fuerza centrífuga. Así, el momento debido al peso de la moto se reduce, lo que implica un menor ángulo de inclinación. De todas formas, cualquier beneficio proveniente de un dispositivo de este tipo, podría verse superado por problemas de tipo práctico y de estabilidad. En línea recta, cualquier carga aerodinámica cargaría más los neumáticos y por lo tanto tendríamos más capacidad de tracción. Si tuviéramos unos frenos lo suficientemente buenos, y un motor lo suficientemente potente, esta mayor adherencia nos permitiría poder frenar y acelerar mejor.

5.2.4 Túnel de viento

No resulta sencillo realizar estudios aerodinámicos. Desde el punto de vista analítico, la complejidad de las ecuaciones diferenciales que rigen el movimiento de los fluidos hace inviable su resolución completa alrededor de cuerpos complejos, siendo necesario despreciar muchos fenómenos normalmente viscosos y turbulentos. De esta manera obtenemos aproximaciones sesgadas a la realidad. Lo mismo ocurre con el empleo de rutinas de cálculo matemáticas. Las necesidades de potencias de cálculo para poder resolver un problema completo con todos sus elementos hace imposible su empleo masivo, quedando su utilización reducida a la comparación de resultados para distinguir entre soluciones mejores y peores. La imposibilidad de modelar la rugosidad superficial del elemento a ensayar hace que los cálculos en términos de resistencia queden afectados de forma cuantitativa aunque no de forma cualitativa.

Las herramientas de simulación numérica son fundamentales en ingeniería de fluidos, pero por las debilidades mencionadas no están aún en posición de poder desplazar a los ensayos aerodinámicos sobre el terreno.

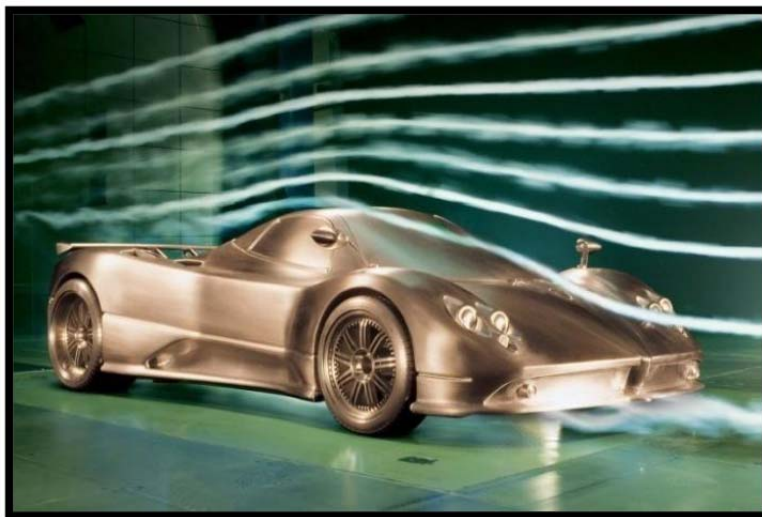


Figura 5.19: *Análisis de una maqueta PAGANI ZONDA R.*

A partir de aquí se abren dos modos de operación, evaluaciones a posteriori sobre el terreno o experimentación en laboratorio. Pensando solamente en vehículos terrestres, la ventaja del túnel aerodinámico es que no será necesario tener un modelo terminado, propulsado, equipado y listo para rodar

de manera autónoma. Igualmente existirán mayores dificultades con la instrumentación que debe ser transportada en el vehículo. También aparecerán dificultades derivadas de las irregularidades del terreno. De esta manera, en un túnel, se pueden testar maquetas de material compuesto o incluso arcilla o madera, más baratas de fabricar y modificables en el caso de no obtener los resultados deseados.

En la evolución de los estudios aerodinámicos en túnel, fueron los hermanos Wright los que usaron un primitivo túnel de viento para estudiar el comportamiento de los perfiles de su Flyer I, si bien existían túneles anteriores.

Desde entonces hasta hoy diversos tipos de túneles se han ido creando con este objetivo, primero a base de gases comprimidos y posteriormente con la incorporación de motores y compresores para acelerar el flujo en la cámara de ensayos. Hoy en día existen instalaciones aerodinámicas de todo tipo y tamaño, desde pequeños túneles en universidades y otros centros de investigación hasta macro-túneles donde poder estudiar vehículos a tamaño real... existen túneles criogénicos donde se emplean gases a baja temperatura o de agua. Y no solo se emplean para estudiar propiedades aerodinámicas como fuerzas y momentos, sino para estudiar fenómenos de capital relevancia como la formación de hielo en planos y superficies de control o en la entrada de las admisiones de los motores de los aviones. También existen algunas instalaciones de túneles supersónicos donde estudiar el comportamiento de ondas de choque para vehículos de muy alta velocidad. Gracias a ellos se ha optimizado la forma de los vehículos espaciales, dando una respuesta a las elevadas necesidades de refrigeración en la violenta entrada en una atmósfera planetaria.



Figura 5.20: Fotos de motos en túnel de viento. A estas se les incluye el piloto, ya que éste afecta a la aerodinámica.

Existen diferentes formas para los túneles aerodinámicos:

- Túnel abierto/cerrado
- Cámara de ensayos abierta/cerrada
- Túnel soplado/aspirado

Cada una de estas soluciones tiene sus ventajas y sus inconvenientes, pero no vamos a entrar a definir y discutir cada una de ellas. Solo decir que la decisión sobre la morfología concreta de un túnel para una aplicación resulta en ocasiones ardua y compromete el éxito de la instalación.

En lo que al mundo de la competición respecta, la tecnología automovilística es la que más tiempo y dinero ha invertido en estudios aerodinámicos, ya que tiene mayor influencia que en las motocicletas y han sufrido mayores cambios de normativa en este aspecto. Los estudios aerodinámicos han estado siempre en la punta de lanza de la lucha por la centésima. Las mejoras iniciales en este campo son de las que mejor relación rendimiento/coste tienen. Pequeñas inversiones consiguen gran impacto en los tiempos del vehículo. Seguir avanzando por este camino, como todo, resulta cada vez más caro, aunque su eficacia queda fuera de toda discusión.



Figura 5.21: F1 a escala reducida con suelo rodante.

El trabajo en túnel es entonces indispensable, además de caro para una maqueta de un vehículo a escala real o incluso 1:2. Por lo que el uso de técnicas CFD se hacen indispensables en el camino de eliminar aquellas soluciones no-óptimas y seleccionar solo un número pequeño de configuraciones a reproducir con absoluta precisión y probar en túnel. Esta tecnología conocida como CFD o Dinámica de Fluidos Computacional, estudia los fluidos mediante modelos matemáticos calculados con ayuda de ordenadores a la que más adelante le dedicaremos un apartado completo.

El tamaño es un tema muy interesante, porque afecta a la validez de la extrapolación a una máquina real de los resultados obtenidos con un modelo a escala. Los túneles de viento que son suficientemente grandes para alojar una moto o coche de tamaño real, son muy caros de

construir y de utilizar, y por lo tanto si podemos utilizar modelos a escala, podremos ahorrar una gran cantidad de dinero. Sin embargo el uso de modelos también plantea sus dificultades. En primer lugar existen problemas bastante evidentes, como la precisión del modelo, por ejemplo una tolerancia de 1 mm, en el objeto real supone una tolerancia de 0.2 mm en un modelo a escala 1:5.

Figura 5.21.a: Túnel de viento para vehículos de tamaño real.



Figura 5.21.b: Túnel de viento para objetos de tamaño reducido.

Reynolds, uno de los primeros investigadores de dinámica de fluidos, descubrió que las características de la turbulencia de objetos de forma similar y distintos tamaños, dependía de su tamaño y de la velocidad del aire. De hecho, si reducimos a la mitad el tamaño de un objeto, necesitamos duplicar la velocidad del aire para conseguir un flujo de características similares. Este efecto se formalizó en una expresión matemática conocida como número de Reynolds (véase el apartado de fluidos). Para conseguir flujos similares con modelos de diferentes tamaños, tenemos que intentar que este número se mantenga constante, pero en muchos casos es muy difícil. Asumamos que queremos investigar la aerodinámica de una motocicleta que circula a 150 km/h usando un modelo a escala 1:6 en el túnel de viento. Necesitamos (para obtener un número de Reynolds similar) que la velocidad en el túnel del viento fuera de unos 900 km/h, lo que automáticamente introduce más problemas. Se necesitaría una potencia tremenda para conseguir esta velocidad del aire, y las fuerzas en el modelo serían extremadamente elevadas, lo que implicaría dificultades de montaje.

De hecho, con el mismo número de Reynolds, la fuerza aerodinámica en el modelo sería la misma que la que existiría en el objeto real. Y por si todo esto no fuera lo suficientemente complicado, los 900 km/h están muy cerca de la velocidad del sonido. Conforme nos acercamos a esta velocidad, aparecen problemas de compresibilidad que desestabilizan todas las características del flujo. El resultado final de todo esto es que los ensayos con modelos a escala reducida se deben llevar a cabo con números de Reynolds bajos y es necesario tener mucho cuidado y mucha habilidad para poder interpretar los resultados de forma correcta.

Para que un ensayo en túnel aerodinámico sea válido es necesario observar algunas precauciones aparte de las mencionadas hasta ahora. El efecto de giro de la rueda o que el suelo sea estático puede llegar a generar variaciones significativas en el estudio. Para ello algunos túneles disponen de unos rodillos que hacen girar a las ruedas o incluso a toda una plataforma rodante para simular la diferencia de velocidad del vehículo respecto al suelo. En motociclismo no es muy relevante ya que son solo dos ruedas, la superficie exterior es curvada y tiene menor huella de contacto (por tanto es aerodinámicamente más eficiente). El tema de suelo rodante prácticamente tampoco tendría sentido en nuestro caso, ya que está pensado para vehículos que puedan llegar a generar efecto suelo o que tengan gran cantidad de superficie pegada al suelo. En el mundo de las dos ruedas no merece la pena que el túnel tenga estas características, ya que económicamente tendrá un mayor coste.

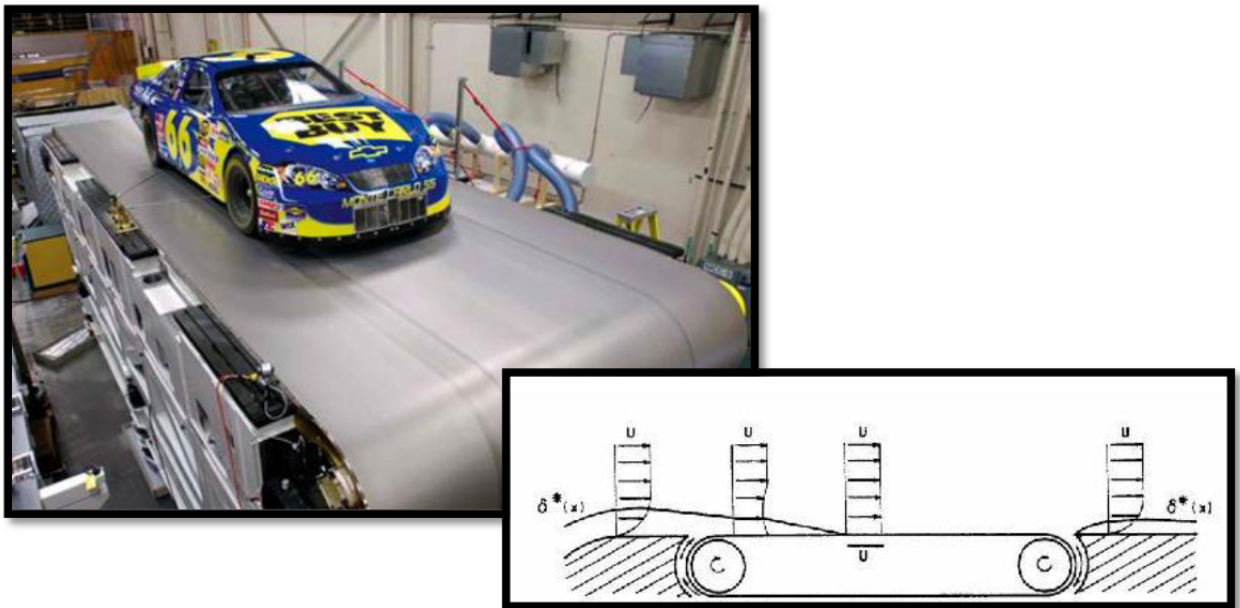


Figura 5.23: El objetivo de un suelo móvil, es simular el perfil de velocidades la capa límite por debajo del coche.

Para analizar los resultados se emplean varios métodos. Por una parte estarán los análisis cuantitativos, es decir, fuerzas y momentos generados en el vehículo que se obtendrán mediante dispositivos preparados para ello. Y por otro, estará el análisis cualitativo, que se hará mediante un análisis visual, donde se podrá ver como es el recorrido del flujo, donde se generan turbulencias, etc. Para este último análisis existen diferentes técnicas: se crean líneas de humo o de aire tintado, se adhieren pequeños cordones de lana a la superficie, se coloca estratégicamente arena o líquidos de color sobre la superficie del vehículo, etc. Aquí podéis ver algunos de los resultados:



Figura 5.24: *Diferentes métodos de análisis en túnel de viento.*

Otra ciencia de la dinámica de fluidos que está relacionada con la aerodinámica, es la hidrodinámica. Etimológicamente, la hidrodinámica es la dinámica del agua, pero por lo general se le denomina así al estudio de la dinámica de fluidos incompresibles. Por tanto, a bajas velocidades existe una gran similitud en el comportamiento de los gases y los líquidos. Muchas veces se aprovecha esta similitud para hacer estudios y simulaciones en túneles de agua. Se suelen analizar objetos pequeños y modelos a escala de objetos mayores, como puede ser un coche. Hay que tener en cuenta que muchos factores como la viscosidad y la densidad del agua difieren mucho de la del aire, pero sirve para obtener una idea general del comportamiento aerodinámico del objeto en estudio. No se puede llegar a tener los resultados que se obtendrían en un túnel de viento, pero resulta muchísimo más económico.

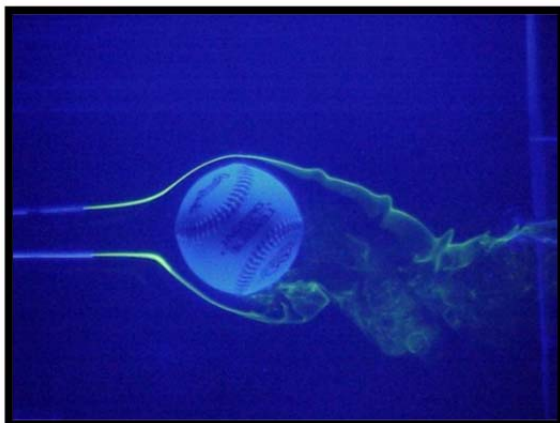


Figura 5.25: *Ensayos en túneles de agua. Utilizando tintes se puede ver el comportamiento de la estela.*

5.2.5 Evolución de los carenados de competición

En los años 50 los diseñadores de motos empezaron a pensar en diseños aerodinámicos y a hacer una serie de pruebas con resultados muy positivos.

Por ejemplo, en el año 1956, la revista "Motor Cycle" mostró los beneficios una buena penetración aerodinámica. Le pidieron a Laurie Watts, un artista técnico, que diseñara un carenado muy aerodinámico y semi-cerrado, para cubrir una Royald Enfield de 350 cc y cinco años de antigüedad. Esto dio lugar a un incremento de peso de 20 kg, pero debido a las mejoras aerodinámicas incluso se mejoró la aceleración en el rango entre 24 a 64 km/h. La resistencia aerodinámica con el carenado puesto resultó ser aproximadamente un 75-85% menor que sin carenado. Por lo tanto, si es posible mejorar de esta forma las prestaciones con un carenado de este tipo, imaginemos lo que se podría conseguir con un vehículo diseñado a propósito.



Figura 5.26.

Desde un punto de vista aerodinámico la clásica forma de lágrima que se muestra en la *figura 5.10* sería difícil de mejorar. NSU utilizó una aproximación a esta forma para batir varios records del mundo de velocidad en las clases más pequeñas. Existieron planes para usar versiones más cortas de este tipo de carenados en los grandes premios y posteriormente en motos de calle, pero los cambios que la FIM (Federación Internacional de Motociclismo) introdujo en el reglamento en 1957 prohibieron cualquier cosa que no fuera un carenado de lo más rudimentario. Un legado que llega hasta nuestros días.

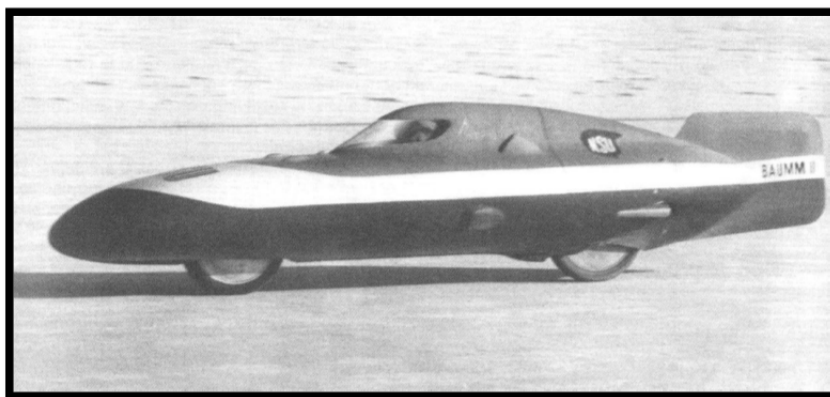


Figura 5.27: NSU "flying hammock" a través del lago salado de Utah a 240 km/h en el año 1956. Probablemente una de las motocicletas más aerodinámicas que se han construido. La aleta de cola sólo

se utilizaba para pruebas de más de 240 km/h.

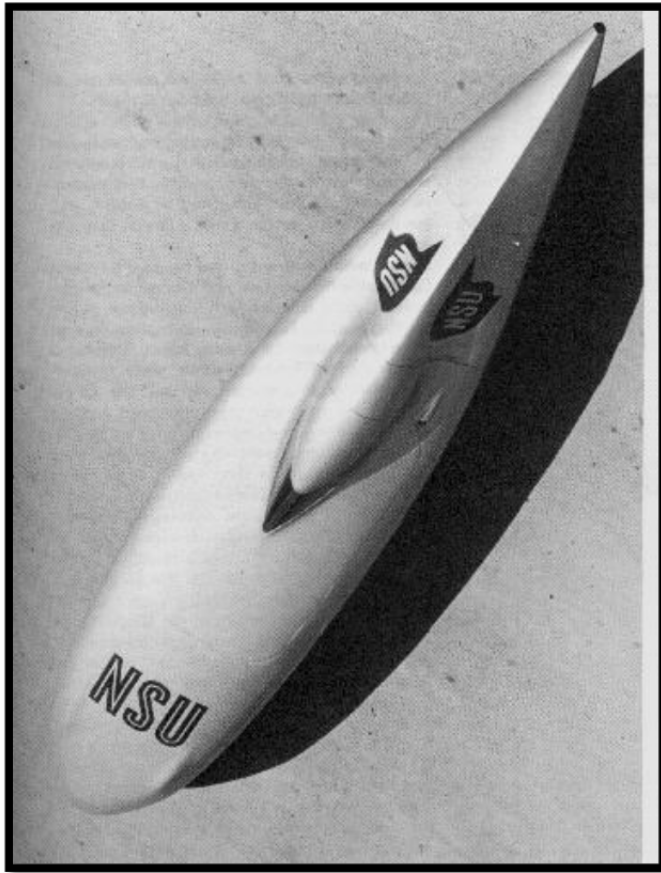


Figura 5.28.

La clásica forma de lágrima tiene una sección frontal circular que queda cerca del suelo en su parte inferior, esta proximidad interfiere con el flujo de aire simétrico, y por lo tanto es necesario modificar esa forma ideal, si tenemos en cuenta este aspecto. Habitualmente, esta interferencia con el flujo de aire también produce una fuerza de sustentación.

La vista superior de la NSU caza records muestra cómo el diseñador se aproximó muchísimo a una forma de

lágrima perfecta. Nótese la relación existente entre la longitud (muy grande) y la anchura, que permite utilizar un ángulo muy suave en la parte del final.

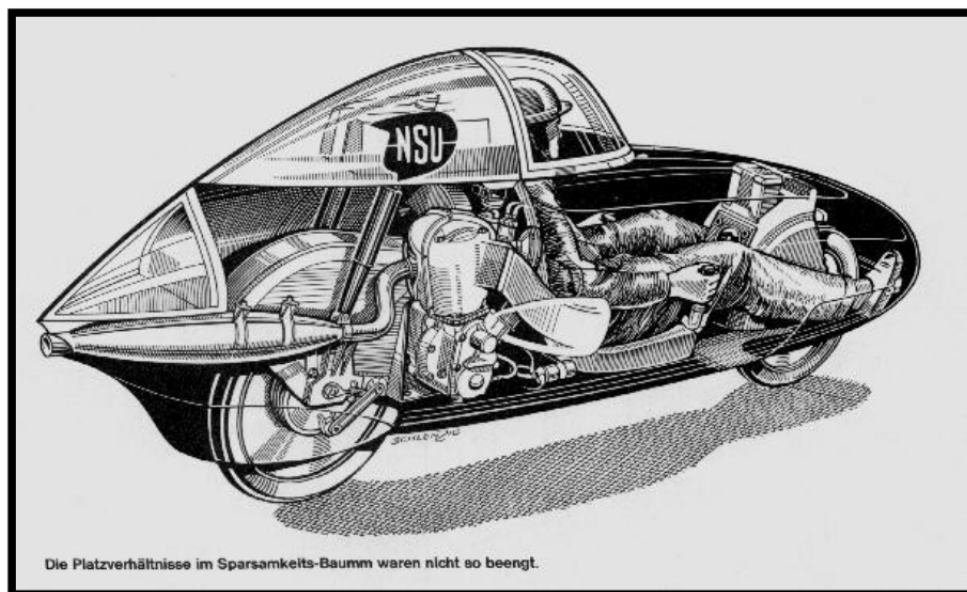


Figura 5.29: Diseño interior de la Roadrace NSU Hammock.

En el mundo de la competición, los carenados han ido evolucionando desde los años 50 hasta hoy de la misma manera que podemos apreciar en las siguientes imágenes:

AÑOS 50

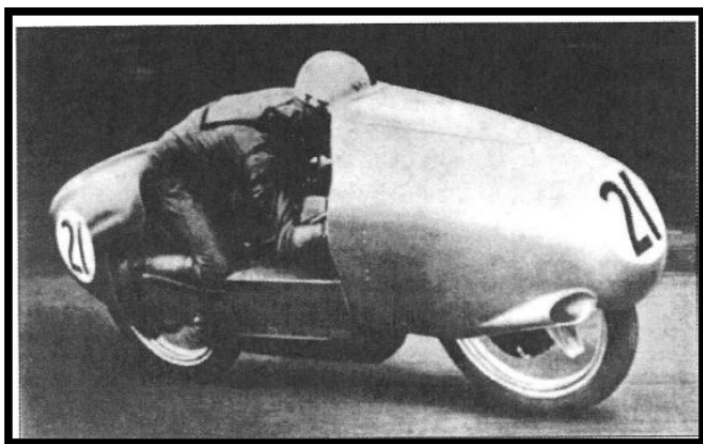


Figura 5.30.

Aunque nunca dio lugar a una moda en las carreras, esta Norton Kneeler de 1953 se usó para batir el record de la hora, dejándolo en 256 Km, en el circuito de Montlhery con Ray Amm a los mandos.

Figura 5.31.

Esta NSU Rennmax de 1954 es un ascendiente directo de las líneas aerodinámicas que se utilizan hoy en día. No cabe duda de que esa nariz hacía que el morro tendiera a levantarse con la velocidad.

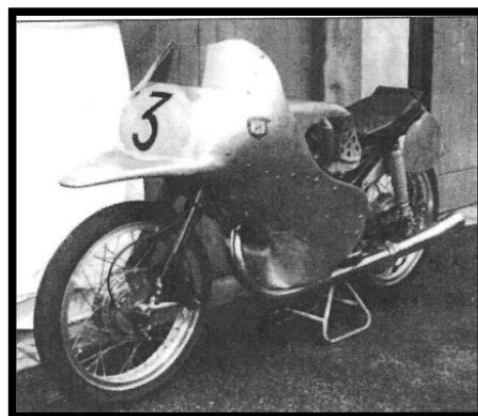
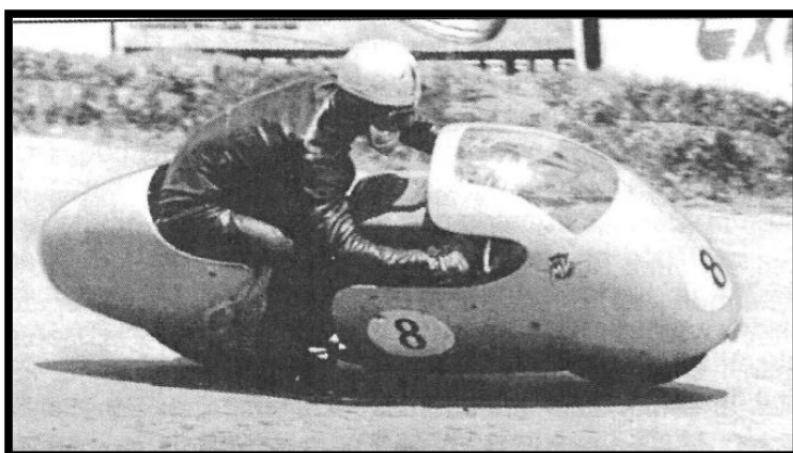


Figura 5.32.

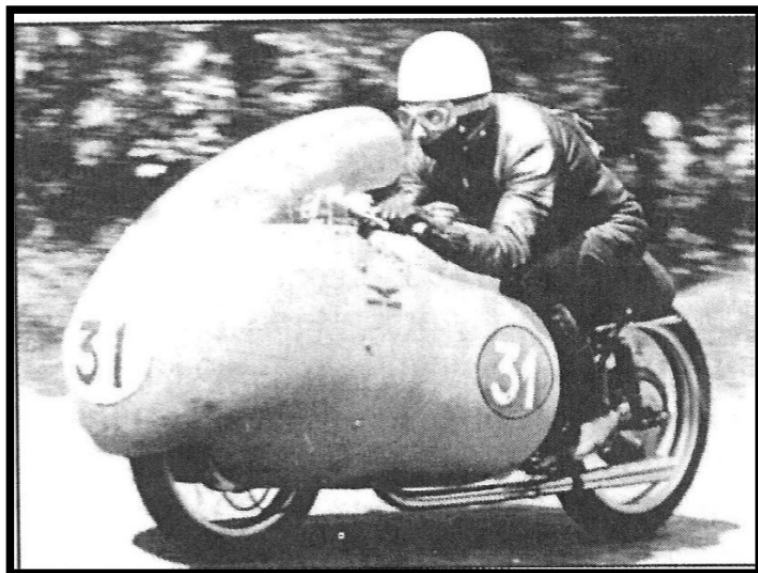
Este tipo de carenados frontales era muy popular en todas las categorías en los años 50. Sin embargo carenar la parte trasera no era tan habitual, generalmente sólo se utilizaban en las motos de 125 cc, que necesitaban toda la ayuda que se les pudiera



proporcionar. Para los rivales era más difícil coger rebufo porque la estela era menor. Este es el varias veces campeón del mundo Carlo Ubbiali, ganando el GP de Bélgica de 1956 sobre una MV Augusta 125 cc.

Figura 5.33.

En los años 50 Moto Guzzi tenía su propio túnel de viento a escala real. Las motos diseñadas por Carcano fueron probablemente las que tuvieron los carenados tipo “dustbin” (cubo de basura) más aerodinámicos de aquella época. Aquí podemos ver una monocilíndrica de 500 cc en el TT con Deith Campbell a los mandos. Los 240 km/h de velocidad máxima que alcanzaba con 47 CV de potencia nos pueden dar una idea de su eficiencia aerodinámica.



AÑOS 60

Figura 5.34.

Después del año 1957, la FIM prohibió ciertos tipos de carenados, rápidamente la forma de “delfín” pasó a ser la norma a finales de los 50 y principios de los 60. Esta foto del gran Bob McIntyre sobre una Honda 250 en el TT de 1961 muestra las formas básicas que se han mantenido hasta nuestros días.

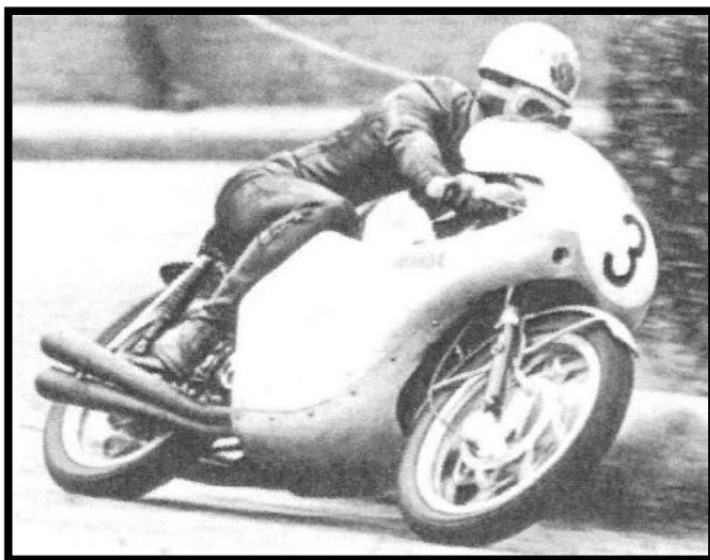


Figura 5.35.

Frank Camillieri en su TD1-B en Loudon en el año 1969.



AÑOS 70

En esta década vuelven a tomar importancia el tamaño de los colines para reducir la estela que deja la moto e intentar reducir así la resistencia aerodinámica.



Figura 5.36.

La moto de la izquierda es una Yamaha CAT II fabricada por Rudi Kurth en 1974.

En las dos fotos de abajo tenemos una Monark creada en 1975 también por Rudi, donde le podemos ver junto a su esposa en la feria sueca de motocicletas.

Esta moto nunca se llegó a pagar, por falta de financiación por parte de Monark.

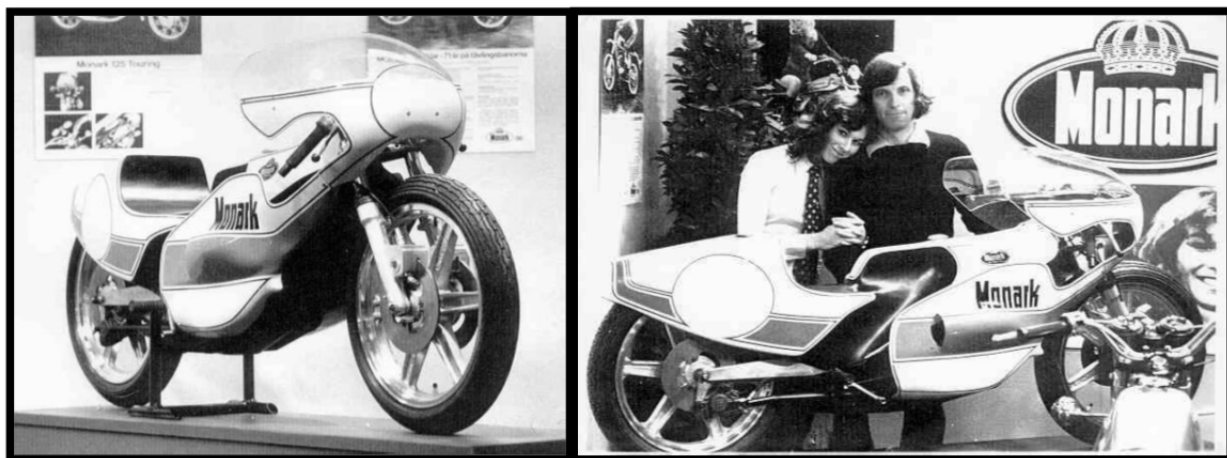


Figura 5.37.

Como podemos ver, en los carenados de algunas motocicletas llego a tomar más importancia el colín que los laterales que cubren el motor.

AÑOS 80

Los carenados de los años 80 se asemejan mucho a lo que podemos ver hoy en día. Las pequeñas diferencias más destacadas son que la cúpula frontal eran algo más grandes y redondas y que los colines son más grandes y acaban en un corte (estilo cola Kamm de la figura 5.10). Las siguientes fotos son, de izquierda a derecha, una Honda NR500 de 1980, una Honda NS500 de 1982 y una Yamaha YZR500 de 1987:



Figura 5.38.

Estas dos últimas fueron tomadas a principio de los años 80, son dos motos Rotax de 125cc de competición. Llama la atención el tamaño tan reducido del colín.



Figura 5.39.

AÑOS 90 HASTA HOY DÍA

Los últimos 20 años la carrocería de las motos de competición no ha variado mucho. Todas se basan en la misma forma básica, sobre todo por las limitaciones que imponen las propias competiciones. La aerodinámica de las motos no ha sufrido un cambio tan drástico como ha podido ocurrir en el mundo de las cuatro ruedas.

A continuación se mostrarán diferentes modelos en función del año para poder diferenciar las pequeñas variaciones que se han ido haciendo los últimos años. Hay que tener en cuenta la cilindrada de cada moto, ya que hay cierta diferencia, sobre todo en tamaño.

Categoría Inferior del campeonato del mundo (125 cc hasta 2012 donde pasa a Moto3 con motores de 250cc). En la parte superior se ve la evolución de Derbi/Aprilia, que siguieron las mismas líneas y en la inferior la de Honda.



2012 - 2013

Durante estos años pasa a ser la categoría de Moto3 que abre una nueva puerta a muchas marcas que no son comerciales o que ya no participaban en el campeonato del mundo.



Categoría Reina del campeonato del mundo. 500 cc hasta 2003 donde pasan a ser motores de 990 cc. En 2007 se redujo la cilindrada a 800 cc hasta 2012 que se volvió a los motores de 1000 cc. En esta categoría se mantienen a lo largo de los años varias marcas, por lo que simplemente se va a establecer la evolución general de la aerodinámica de la categoría.



1990

1994

1997

2000



2004

2009

2011

2013



La aerodinámica de los últimos 5 años no ha variado prácticamente nada. La Honda RS de 125cc sigue exactamente con el mismo diseño de hace 5 años. Las variaciones de la Aprilia son prácticamente inapreciables. Las motos de gran cilindrada han sufrido alguna variación más, pero sin ninguna importancia considerable. Lo que se puede diferenciar de esta generación a la anterior es que la quilla (la parte de abajo) es más estrecha y llena casi por completo el espacio que hay entre ambas ruedas. Nótese también como el guardabarros delantero cubre las barras de la horquilla. Y por último, lo que más ha podido llegar a variar estos últimos años es la parte trasera del colín, que se ha alargado y elevado para ayudar a suavizar el flujo que pasa por la espalda del piloto.

5.3 CFD (Dinámica de Fluidos Computacional)

Tradicionalmente, las mediciones de las prestaciones aerodinámicas reales de vehículos se han llevado a cabo en el túnel de viento, pero como ya hemos dicho, este tipo de pruebas son muy caras. Hemos visto también algunos de los problemas que acarrea utilizar modelos a escala reducida en túneles más pequeños, bien sea por las tolerancias del modelo, bien por la dificultad de conseguir números de Reynolds similares. No existe un sustituto real para los túneles que trabajan con modelos de tamaño real y velocidades de viento reales, pero ese tipo de instalaciones son muy grandes y muy caras de construir. Se necesita una gran potencia para hacer girar los ventiladores. Lleva mucho tiempo depurar la forma del vehículo. Se hace una prueba, se modifica el modelo según hayan indicado las pruebas, se vuelve a repetir el ciclo de prueba/modificación, así muchas veces.

Sin embargo, con la aparición de ordenadores cada vez más pequeños y potentes, llega una nueva alternativa, el CFD (Dinámica de Fluidos Computacional). Este es un tipo de software basado en Elementos Finitos orientado al análisis de fluidos. Con el CFD el aire que está alrededor del vehículo se divide en un gran número de pequeñas celdas y después se calcula la presión, la velocidad y la turbulencia de cada celda, pero teniendo en cuenta que esas variables deben estar en equilibrio entre una celda y la siguiente, a través de los límites de cada celda. El problema es que es necesario crear millones de celdas para modelar el flujo incluso alrededor de una forma simple. Así este tipo de software se utiliza para:

- Crear y definir las numerosas celdas, con dibujos de CAD o digitalizando con un escáner láser.

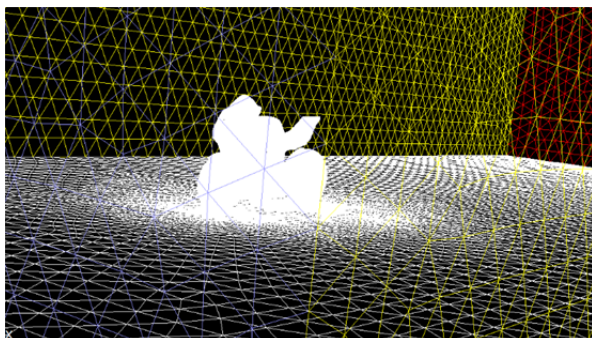
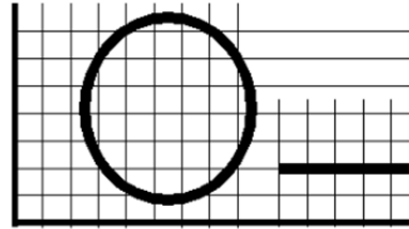
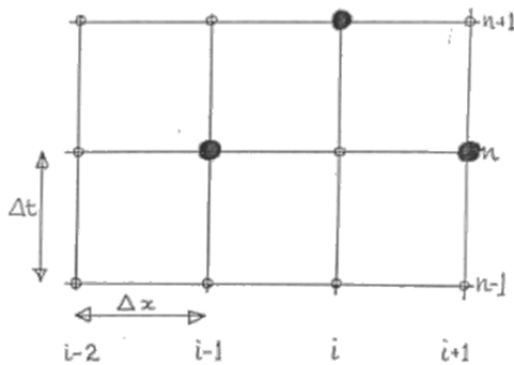


Figura 5.40: Estas son representaciones de las rejillas de celdas que están alrededor de la moto y del piloto. En realidad las celdas están en 3D y llenan todo el volumen alrededor de la moto, literalmente se necesitan millones de celdas para modelar correctamente el flujo.

- Relacionar las propiedades de todas las celdas mediante un conjunto de ecuaciones no lineales.

Estas son algunas de las ecuaciones que manejan estos programas de CFD:

- $$u_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{u(x + \Delta x) - u(x)}{\Delta x} \quad (19)$$



- Si $\alpha = 1$ entonces hay diferenciación hacia atrás (backward differencing):

$$\frac{\partial u(x_i)}{\partial x} \approx \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta x} \quad \text{con un error} = O(\Delta x) \quad (20)$$

- Si $\alpha = -1$ entonces hay diferenciación hacia adelante (forward differencing):

$$\frac{\partial u(x_i)}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x} \quad \text{con un error} = O(\Delta x) \quad (21)$$

- $$m \frac{d}{dt} v_i(t) = \sum F_j \leftrightarrow i \neq j \quad (22)$$

- $$\rho U_k \frac{\partial U_i}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \quad (23)$$

Fluido estático, incompresible donde $R_{ij} = -\rho \overline{u_i u_j}$ (tensiones de Reynolds)

- El programa crea una serie de gráficos que se usan para presentar los numerosos valores de forma que sean fáciles de procesar y estudiar para un humano.

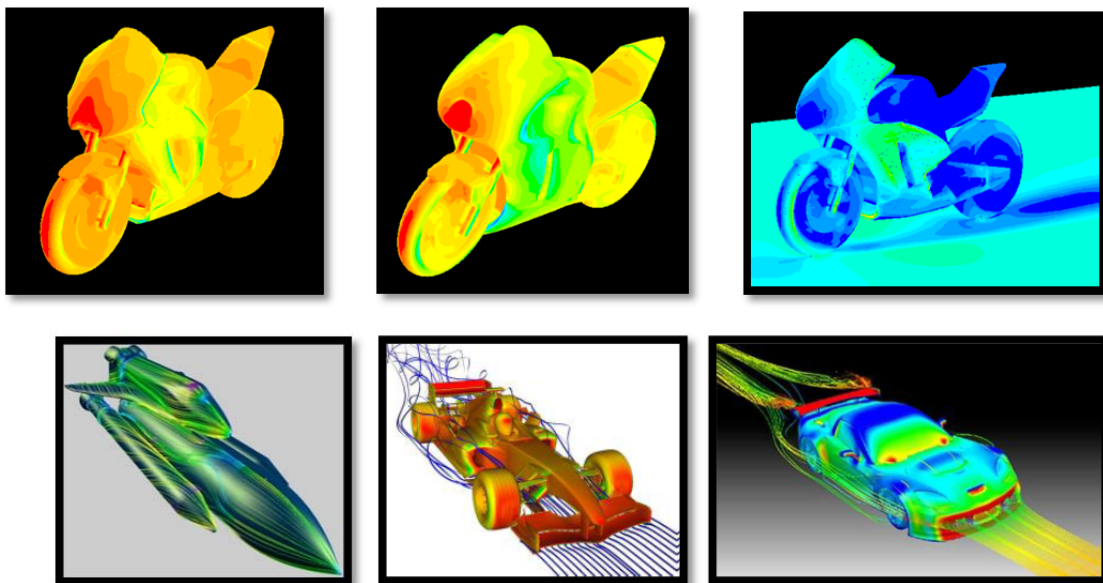


Figura 5.31: Gráficas obtenidas con CFD. Muestran diferentes distribuciones sobre el vehículo.

Estas técnicas prometen grandes reducciones de costo y tiempos de desarrollo cortos. No es necesario construir modelos físicos, los modelos se definen directamente con los dibujos de CAD del vehículo. Es posible iterar con relativa rapidez con un amplio rango de diseños alternativos, porque sólo se necesita modificar unas pocas superficies del dibujo, y volver a repetir después los cálculos con el ordenador.

La evolución de la informática en estos últimos años nos permite realizar en ordenadores de sobremesa cálculos y simulaciones que hasta hace poco era impensable realizarlas si no se disponía de potentes ordenadores de difícil acceso. Aun así queda mucho camino por recorrer para poder hacer todo tipo de simulaciones. Para modelos grandes, complejos y de especial definición sí que se requieren ordenadores potentes. Hoy en día también existe la posibilidad de conectar una serie de ordenadores en red para que trabajen conjuntamente y poder reducir así los tiempos de cálculo, ya que pueden tardar desde minutos hasta meses.

Algo similar ocurrió con el FEA (Análisis por Elementos Finitos) en diseño estructural. Cuarenta años atrás ese tipo de técnicas sólo estaba a disposición de especialistas que tenían acceso a grandes estaciones de trabajo, y requerían que el usuario tuviera un gran nivel de conocimiento de tales técnicas. Hoy en día, esos métodos están disponibles para cualquier diseñador que tenga un ordenador de sobremesa y un programa de CAD de nivel medio/alto. El CFD es matemáticamente similar al cálculo estructural mediante FEA, de hecho es realmente el FEA de un flujo, pero la gran diferencia está en el gran número de elementos o celdas que se necesitan para modelar adecuadamente un problema de flujo, y más importante, la mayor complejidad de las ecuaciones no lineales que aparecen.

6. Diferentes vías de trabajo

El presente proyecto se centró en la limpieza de las piezas y su análisis aerodinámico. Con este tema se sobreentiende que principalmente debe analizar la carcasa exterior de la moto, es decir, el carenado, y hacer una evaluación de las posibles soluciones con el fin de reducir la resistencia aerodinámica.

Lo siguiente fue analizar y evaluar las posibles vías de trabajo para poder realizar este PFC y ver si sería posible hacerlo con los medios que de los que se dispone.

En un principio se pretendía obtener dos modelos y después analizar y comparar sus propiedades aerodinámicas. Por tanto se separaron en dos grupos todos los métodos que conocemos para diseñar y realizar un análisis aerodinámico:

6.1 DISEÑO

6.1.1 Diseño asistido por ordenador (CAD)

Hoy en día hay muchos programas informáticos con los que se puede dibujar en tres dimensiones cualquier cosa que te propongas. Las licencias de estos programas no son baratas pero te pueden ahorrar mucho dinero a la hora de fabricar, ya que te permiten detectar fallos antes de fabricar nada. Esto puede suponer fabricar bien el prototipo a la primera y reducir trabajo de post-proceso.

El diseño de la motocicleta mediante este método facilita las cosas a la hora de trabajar en equipo. Si cada uno diseña una pieza diferente, de esta manera se podrá ver si lo que se va haciendo es compatible o si interfiere con lo que esté haciendo cualquier otro. De esta manera también se puede completar la maqueta digital uniendo las diferentes piezas de la motocicleta.

Actualmente los software CAD más utilizados son:

- **Auto CAD:** Este programa es el más empleado para dibujar planos y todo tipo de figuras en 2D. Su interfaz para dibujar en 3D es más pesada y engorrosa que el resto.
- **CATIA:** Este programa está pensado para diseños de piezas y productos en 3D. En la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Aeronáutica se imparte un cursillo de 10 horas a todos los alumnos. Son unos conocimientos básicos que facilitarían el proceso de creación de los diferentes modelos. Además en la EUITA se dispone de soporte, técnicos especializados y computadoras dotadas con este.
- **Pro Engineer**

- *Solid Works*
- *Rhinoceros*
- *Inventor*

Los cuatro últimos son parecidos a los dos anteriores

6.1.2 Ingeniería inversa

Como se ha comentado anteriormente, si en lugar de comenzar a diseñar desde cero partimos de un modelo existente, para dibujar el modelo en 3D en un programa CAD, necesitamos herramientas de ingeniería inversa.

Se trata del caso de este proyecto, en el que se usan carenados originales o a escala, ya que las maquetas de juguetería de hoy en día pueden llegar a ser réplicas exactas con todo lujo de detalles pero en tamaño muy reducido. El inconveniente de usar escalas reducidas es que pueden aparecer más imperfecciones a la hora de trasladar el modelo a formato digital.

Estas son algunas herramientas que se podrían utilizar para digitalizar un modelo existente en el mercado:

ESCANER: Se pueden encontrar todo tipo de escáneres 3D que digitalizan en una nube de puntos las superficies del objeto a escanear. Estos mapas se componen por millones de puntos dependiendo de la precisión y tipo de escáner. Los dos tipos de escáneres 3D son el de contacto y sin contacto. Los de contacto examinan el objeto por medio del toque físico y los de sin contacto mediante algún tipo de radiación como la luz (laser), ultrasonido o radiografía.

El punto de la nube producido por escáneres 3D generalmente no es usado directamente. La mayoría de las aplicaciones no usan nubes de punto, pero en su lugar usan modelos poligonales 3D. El proceso de convertir una nube de puntos en un modelo poligonal 3D se llama la reedificación o reconstrucción. Esto implica encontrar y conectar los puntos adyacentes para crear una superficie continua. Muchos algoritmos están disponibles para este propósito. Por tanto después del escaneado se precisa hacer un post-proceso digital y para ello se necesita software y conocimientos específicos.



Figura 6.1: Escaneado de un coche con un escáner laser.

Los escáneres son muy caros, así que existen empresas especializadas en ingeniería inversa que pueden hacer este tipo de trabajo.

PALPADORES: Otra solución más barata podría ser fabricar un CMM (Maquina de Medición por Coordenadas) para medir de forma manual con palpadores. Se trata de construir un sistema de barras móviles del tamaño de un carenado que permita de alguna manera medir diferentes puntos estratégicos para luego digitalizar en un programa CAD cada punto mediante un sistema de coordenadas.



Figura 6.2: Reloj palpador.

A parte de tener que diseñarlo y construirlo, uno de los mayores inconvenientes es que la estructura de barras debe estar muy bien diseñada para no cometer grandes imprecisiones. También sería necesario diseñar un sistema para que el carenado se quede fijo y no se mueva durante las mediciones. A la hora de tomar datos, este método es muy lento.

FOTOGRAMETRÍA: Esta técnica permite realizar un modelo tridimensional a partir de una serie de fotografías, en la cuales se deben marcar algunos puntos denominados puntos de apoyo. Una vez procesadas las fotografías se encuentra la posición en el espacio de estos puntos y se trabaja la geometría a partir de estos.



Figura 6.3: Marcado y fotografiado de un Toyota Corolla.

6.2 Análisis aerodinámico

Una vez que obtenido el modelo del diseño se le realiza un análisis aerodinámico para ver su efectividad y ver qué se podría llegar a mejorar. En caso de tener varios modelos un análisis aerodinámico permitiría compararlos y hacer una elección de manera correcta y objetiva.

El tipo de análisis dependerá del formato de diseño empleado o viceversa. Por ejemplo, si el modelo es una maqueta, la única manera analizarlo es metiéndolo en un túnel de viento. Por otro lado, si el único método de análisis disponible es el CFD, obligatoriamente es necesario un modelo en formato digital.

Estos son algunas de las alternativas para poder realizar un análisis exhaustivo de la aerodinámica de la motocicleta:

6.2.1 Túnel de viento

El túnel de viento sirve para analizar maquetas, prototipos o cualquier otra moto del mercado. Es decir, objetos físicos en estado sólido. Como ya se explicó en el apartado de fundamentos teóricos, existen dos grupos principales:

- **A tamaño real:** Es la opción más fiable y sencilla de utilizar, pero debido a su gran tamaño resultan muy caros. No existen muchos de estos y el más cercano a nuestras instalaciones estaría en Francia.
- **A escala:** Hay que tener en cuenta todas las propiedades que se ven afectadas por la escala, como ya se explicó en el apartado de teoría. Es necesario hacer una maqueta. El coste del túnel es algo más barato, dependiendo de la escala. En “Epsilon Euskadi” (País Vasco) disponen de un túnel de viento que ronda entre un 50 y un 60% de escala para coches. Puede que sea posible introducir una motocicleta completa incluido el piloto.



Figura 6.4: Túnel de viento de Epsilon Euskadi.

6.2.2 Túnel hidrodinámico

Es básicamente como un túnel de viento pero el fluido en el que se sumerge el objeto es líquido en vez de aire. También es necesario trabajar a escala y hay que tener en cuenta todas las propiedades que se ven afectadas por ella más las que se afectan por trabajar con fluidos. Todo esto también se ve más detallado en el apartado de fundamentos teóricos.

6.2.3 Pruebas en pista

Otra opción mucho más barata pero menos eficaz es hacer las pruebas directamente en un circuito o en una pista adecuada para ello.

Un gran inconveniente es que se necesita la moto construida, por lo que para el estudio de la Ariane2 2013 habría que construirla antes de tener datos de su mejora aerodinámica.

6.2.4 CFD

Evidentemente, los métodos de construcción, han evolucionado enormemente a lo largo de los años, desde el remache de planchas de aluminio hasta su pegado, desde la madera hasta la fibra de carbono, desde las formas con ángulos rectos hasta las formas aerodinámicas que permite realizar la fibra. Todas estas mejoras, en cuanto a materiales y formas, han supuesto un avance extraordinario en lo referente a la construcción y estética, pero no en lo referente al proceso de diseño.

Los métodos computacionales, disminuyen el tiempo de cálculo y el tiempo de construcción del prototipo final o definitivo, dependiendo de las capacidades del ordenador que se vaya a utilizar, si se usa correctamente, las pautas a seguir o los límites que no debemos sobrepasar para que el modelo tenga unas determinadas características de carrera y de comportamiento.

La simulación CFD, abarata y acorta enormemente los tiempos requeridos, y necesarios por otra parte, para diseñar una motocicleta de competición en general. Esto no es más que simular, visualizar, calcular y determinar a priori, cuál será la dinámica del fluido y de la motocicleta, antes de tenerla construida. Para ello, es necesario e imprescindible, disponer del modelo, pieza o motocicleta en su totalidad, en formato CAD, o al menos, en aquel formato que requiera y necesite el software CFD que usemos. La estructura básica de un CFD, es la siguiente:

a) Pre procesado: la parte del programa que dibuja adecuadamente el diseño y lo adecua al CFD, se encarga de preparar el problema a resolver.

b) Procesado: la parte del programa que resuelve el problema.

c) Post-procesado: la parte del programa que visualiza y analiza los resultados obtenidos.

Los resultados que dan estos programas no son reales, siempre serán aproximaciones. No muestran un resultado exacto pero se aproxima lo suficiente a la realidad como para poder considerar las soluciones muy fiables. La precisión de los resultados depende de la calidad del modelo y de la propia simulación. Los ordenadores disponibles para hacer este proyecto probablemente no son lo suficientemente potentes como para hacer simulaciones con maquetas digitales que tengan todo lujo de detalles. Por lo tanto los dibujos digitales deben ser modelos adaptados a las características de los PC's.

Otro pequeño inconveniente es el tiempo necesario para hacer cada simulación. Puede variar mucho según las características, del modelo, la computadora, las propiedades de la simulación, etc. En nuestro caso teníamos que tener en cuenta que cada simulación tardaría horas o incluso días.

A pesar de obtener aproximaciones, la gran ventaja de este método, es que se pueden calcular muchos tipos de soluciones. La cantidad de información respecto a los otros métodos es mucho mayor y muy fácil de interpretar. Pueden mostrar gráficamente distribuciones de presiones, velocidades, turbulencias, flujos, etc. También se pueden calcular fuerzas, momentos, centro de presiones, área frontal, etc.

Las ventajas son obvias: el tiempo necesario a invertir para desarrollar cierto diseño, es extremadamente corto, comparado al usado hace unos pocos años. Por otro lado, el cambio de geometría de un diseño, implica un pequeño cambio en el formato de dibujo correspondiente, pudiendo repetir la simulación en breve espacio de tiempo.

El proceso de toda simulación, es el siguiente:

1. Obtención del diseño en CAD y su adaptación simplificada para el programa CFD.
2. Mallado de la geometría.
3. Iteración y simulación del modelo.
4. Análisis de las soluciones.
5. Vuelta, o no, al paso 1, dependiendo de las conclusiones a las que se haya llegado.

Las aplicaciones son múltiples y muy diversas; en resumen y para no extendernos, se refieren a todos los campos, en los que la dinámica de cualquier fluido, es esencial y es parte del problema o solución.

Existen varios software CFD en el mercado que se usan hoy en día:

FLUENT: Esta es la parte de fluidos del conocido programa de elementos finitos ANSYS. Éste es el programa que se ha utilizado para la realización de este proyecto. La interfaz para este módulo no es muy visual y aunque no es difícil de usar. Equipos de F1 como BMW Sauber son usuarios de este programa.

Star CCM+: Este es uno de los programas más empleados para analizar la aerodinámica en el mundo de la competición del motor. En estos momentos varias empresas españolas de este ámbito están usando este programa para sus proyectos. “Silver Car” está realizando un análisis aerodinámico de su Speed Car e “Inmotec” está haciendo un estudio más profundo de su nueva MotoGP. Se trata de un programa más visual, y por lo tanto algo más sencillo que el Fluent, pero las licencias son caras y la EUITA no dispone de éste programa para poder trabajar con él.

FlowWizard: La única ventaja de este programa es que puede calcular el centro de presiones. Este programa no hace el mallado de la figura a analizar, hay que importarlo de otros programas.

GID: Se trata de un programa más básico y ya tiene unos cuantos años. Se suele usar para mallar el dibujo en 3D y exportarlo a otros programas CFD o FEM.

7. Métodos de trabajo adoptados

A la hora de abordar el estudio, el proceso que se va a desarrollar se va a dividir en dos partes. En la primera se va a hacer un estudio de la motocicleta del 2012 de la que se extraen los puntos débiles en los que se deben realizar las mejoras aerodinámicas. Además de las conclusiones que se obtengan de ese estudio, se hará otro estudio de una motocicleta, también del 2012, de la marca "BETA". Esa motocicleta se usará para compararla con la Ariane2 2012 y de éste modo hallar las diferencias que otorgan una mejor aerodinámica a la motocicleta de la otra marca.

En la segunda parte, el trabajo consistirá en un estudio de control. Será parecido a lo descrito anteriormente, ya que únicamente se pretende comprobar que los cambios que se han efectuado en el carenado mejoran la aerodinámica, siendo ésta, mejor o igual que la de la motocicleta de la otra marca. Disminuyendo la resistencia al aire y creando menos distorsiones en el flujo cercano.

Una vez realizados los tres estudios, se hará la comparativa final en la que se evaluarán los resultados obtenidos en las diferentes motocicletas. Será en este momento en el que realmente se verá si los cambios realizados son positivos y si ha sido posible alcanzar los objetivos establecidos, o no.

Los análisis aerodinámicos de los diferentes modelos se harán por métodos computacionales. En primer lugar, debido a que el proyecto en sí trata de ello; y en segundo lugar, porque el resto de pruebas requieren que se disponga de la motocicleta o de una maqueta a escala, de las que no se disponen. Además, trabajar en túneles de viento no daría unos datos tan precisos como los que se buscan para realizar las modificaciones en la moto. Y en los casos de análisis en pista de prueba, ya se disponen de los comentarios de los pilotos que las han probado.

Por otra parte, por lo general, es muy recomendable hacer un análisis con CFD antes de pasar a pruebas en túneles de viento. De esta forma, si se diese el caso de poder llegar a analizar algún día la moto en un túnel de viento, ya se dispondría de los datos del análisis CFD para poder comparar.

7.1 Software

Con respecto al software disponible, se ha optado por el conjunto de ANSYS, “GAMBIT”, “TGRID” y “FLUENT”. Aunque se trata de un conjunto bastante antiguo, se optó por este conjunto debido a que los alumnos no tenían ninguna experiencia previa con ningún programa CFD y por la experiencia previa del profesor Pindado con ellos. Esto permitió que se les instruyese durante las semanas previas a la recepción de las piezas. Además de la ayuda del profesor Pindado, también se disponía de varios manuales y tutoriales accesibles por internet.

Design Modeler (Antes llamado GAMBIT):

Toda la simulación de ingeniería comienza con la geometría para representar el diseño. Esto podría ser un componente sólido para un análisis estructural o el volumen de aire de un líquido o un estudio electromagnético.

Esta geometría se ha producido en un diseño asistido por ordenador (CAD) o contruidos desde cero. El software de ANSYS DesignModeler es la puerta a la manipulación de la geometría para el análisis con el software de ANSYS.

ANSYS DesignModeler tiene conexiones con los principales sistemas CAD, permitiendo una distribución uniforme de los datos existentes, incluyendo los parámetros.

Los parámetros se pueden ajustar y actualizar el diseño, y cualquier otra característica la eliminación o simplificación se mantienen. Esto se traduce en rápida rotación de los cambios de diseño y actualizaciones.

Los modelos CAD son a menudo diseñados para uso de fabricación y no para la simulación. El uso de modelos CAD como resultado dan una geometría compleja que incluye los detalles que no son necesarios para la simulación, tales como logos y otros elementos pequeños. La simulación de un modelo completamente detallado aumentará el tiempo al ejecutarlo.

Se puede ser más eficiente para pasar un corto período de tiempo en eliminación de estos datos para reducir el tiempo de ejecución total de horas o días.

DesignModeler cuenta con una tecnología que también proporciona potentes herramientas para la construcción de la geometría a partir de cero. Un modelo complejo puede ser producido mediante las conocidas operaciones de modelado de sólidos. Construido en el núcleo Parasolid, el motor de la geometría es robusto y se ajusta a los estándares del sector.

TGRID:

TGrid es un software con un preprocesador especializado que se utiliza para crear mallas de tetraedros no estructurados y HexCore de mallas con superficies complejas y muy grandes. TGrid ofrece avanzadas herramientas de creación de capas prismáticas incluyendo la detección de colisiones y el manejo de ángulos agudos.

TGrid también está equipado con un procedimiento de ajuste de avanzada que produce una alta calidad, la función de tamaño de malla impulsa una superficie conectada triangularmente en un gran número de superficies talladas desconectadas.

TGrid es un software robusto que permite, algoritmos automatizados para ahorrar el tiempo en el procesamiento y generación de mallas de alta calidad para el análisis de CFD en el software ANSYS FLUENT.

Las mallas de superficie y el volumen pueden ser importados a TGrid de Gambit, CATIA, I-DEAS, NASTRAN, PATRAN, Pro / ENGINEER, Hypermesh, ANSYS structural mechanics solutions y muchos más. Las herramientas, se incluyen en TGrid para mejorar la calidad importada en la superficie de la malla y para un rápido montaje en las múltiples partes de la malla.

Las herramientas de diagnóstico de TGrid permiten una fácil verificación de la malla y la calidad.

FLUENT:

FLUENT es un software que contiene amplias capacidades de modelado físico necesario para modelar el flujo, la turbulencia, la transferencia de calor, y las reacciones de las aplicaciones industriales que van desde el flujo de aire sobre el ala de un avión a la combustión en un horno, de columnas de burbujas a las plataformas petroleras, desde el flujo sanguíneo a los semiconductores, fabricación y diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Hay modelos especiales que le dan al software la capacidad de modelar en el cilindro de combustión, aeroacústica, turbomaquinaria y sistemas multifásicos que han servido para ampliar su alcance.

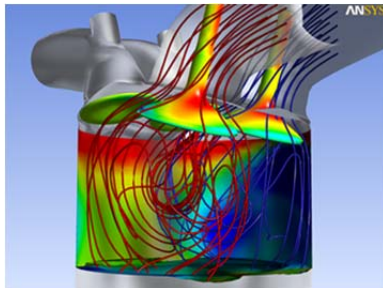


Figura 7.1: Motor de combustión interna modelado utilizando FLUENT.

Hoy en día, miles de empresas de todo el mundo se benefician de la utilización de FLUENT como parte integral de sus fases de diseño y optimización para el desarrollo del producto.

Las funciones definidas por el usuario permiten la implementación de nuevos modelos de usuario y la amplia personalización de los ya existentes. Las capacidades de la configuración de resolución interactivo, solución y post-procesamiento de FLUENT hacen que sea fácil hacer una pausa en el cálculo, analizar los resultados con post-procesamiento integrado, cambiar cualquier ajuste, y luego continuar con el cálculo en una sola aplicación. Los expedientes y datos se pueden leer en CFD-Post para un análisis más avanzado de post-procesamiento de las herramientas y la comparación de los diferentes casos.

La integración de FLUENT en Workbench proporciona a los usuarios con mejores conexiones bidireccionales y a todos los sistemas CAD más importantes, la modificación de la geometría y creación con tecnología ANSYS DesignModeler y avanzadas tecnologías de mallado en ANSYS mallado. La plataforma también permite que los datos y los resultados sean compartidos entre las aplicaciones mediante un sencillo arrastrar y dejar caer, por ejemplo, utilizar una solución de flujo de fluido en la definición de un límite de carga de una simulación de la mecánica estructural posterior.

La combinación de estos beneficios con la amplia gama de capacidades de modelado físico y los resultados rápidos y precisos que el software ANSYS tienen para ofrecer en uno de los paquetes de software más completos para el modelado, disponibles en el mundo de hoy.

7.2 Creación del modelo CAD

A la hora de construir los modelos para los análisis aerodinámicos los técnicos de ArianeTech usaron dos métodos diferentes. Para los modelos de la Ariane2 usaron programas CAD en los que crearon las superficies que nos enviaron para su posterior limpieza. En cambio, para el modelo de la moto competidora, usaron el método de escaneado tridimensional.

Por lo general, el diseño de un nuevo carenado implica una investigación previa de los ya existentes para así evitar fallos básicos que se hayan cometido anteriormente e intentar buscar vías de mejora. También implica tener gran destreza en el uso de las herramientas de dibujo CAD que se vayan a utilizar. Implica tener que fabricarlo con todo lo que con lleva, es decir, previamente habría que fabricar un molde o incluso una maqueta. En definitiva, se requiere mucho tiempo y dinero. Para hacernos una idea, al equipo navarro “Inmotec”, según datos encontrados, les costó desarrollar el carenado de una MotoGP alrededor de un año y 150.000€.

Debido a que se dispone de mucho menos tiempo, el diseño de la Ariane2 2013, se empieza a crear a partir de las conclusiones a las que se llegaron durante la primera reunión y de las investigaciones que se fueron realizando posteriormente. Aparte de esto habrá piezas del carenado del modelo anterior que se reutilizarán con el fin de abaratar costes y de ahorrar tiempo.

8. Desarrollo del trabajo

Tras decidir cómo se abordaría el proyecto este es el seguimiento del proceso.

8.1 Medios informáticos de cálculo

Hardware

El hardware del que se ha dispuesto durante la duración del proyecto han sido cuatro ordenadores diferentes. Inicialmente se disponían de dos ordenadores de sobremesa que posteriormente fueron desechados debido a que sus prestaciones no eran las suficientes. Una vez se llegó a la conclusión de que estos dos ordenadores no tenían la capacidad necesaria para afrontar el trabajo requerido, uno de los alumnos optó por ampliar la memoria RAM del portátil del que disponía, quedándose así con una máquina que estuviese a la altura, con las siguientes características: TOSHIBA SATELLITE A500 con un sistema operativo de 64 bits, 8 GB de RAM y un procesador Intel Core2 DUO de séptima generación a 2,13 GHz. El otro alumno del proyecto optó por comprarse un portátil nuevo, ya que carecía de uno y le sería de utilidad, ya que el ordenador de sobremesa se estaba quedando algo anticuado y en un futuro próximo necesitaría comprárselo. Éste ordenador nuevo es un portátil TOSHIBA SATELLITE C855 con un sistema operativo de 64 bits, 8 GB de memoria RAM y un procesador i5 de tercera generación a 2,50 GHz.

Software

Se ha utilizado el conjunto de programas ANSYS mencionado en el tema anterior. Se han usado las versiones de 32 bits Fluent v6.0, Gambit 2.3.16 y TGrid 3.5.4.

En lo que se refiere al modelo matemático utilizado para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, se ha utilizado un modelo RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) o de promedio de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes.

Este modelo es el utilizado por la práctica totalidad de los códigos CFD, y por tanto también en el Fluent.

En lo que se refiere al tipo de turbulencia utilizado para el modelo RANS, se ha utilizado el modelo de turbulencia K- ξ (K-Épsilon), que es el más ampliamente utilizado.

8.2 Proceso de aprendizaje de los programas

Durante el proceso de aprendizaje del software se crearon algunos tutoriales con el fin de poder consultar en futuras ocasiones en las que la memoria nos pudiese fallar.

8.2.1 GAMBIT

El Gambit es el programa que se va a utilizar para suavizar la geometría de la moto y que la malle de la mejor forma posible, ya que el mallado de la pieza es lo más importante para el correcto análisis aerodinámico.

Dado que la mayor parte del proceso de trabajo se centra en la limpieza de la geometría y del mallado de la moto, es a éste programa al que más horas de aprendizaje se van dedican.


Al principio se empezó a realizar una serie de ejercicios en 2D de geometría muy simple entre los que se realizó un coche, que son las imágenes escogidas para mostrar los ejemplos.

A continuación se va a desarrollar una pequeña guía para mostrar el funcionamiento del programa.

TUTORIAL

Al abrir el GAMBIT se tiene una ventana gráfica con un menú en la parte superior, dos ventanas de (*Transcript y Description*) debajo de la ventana gráfica y dos zonas, situadas a la derecha donde se encuentran los botones (*Operation y Global Control*).

Por defecto la ventana gráfica muestra la vista perpendicular al eje Z, que es con la que se va a trabajar. Se pueden seleccionar otras vistas para ver individualmente o todas juntas con el

botón  (*Select Preset Configuration*) y las opciones que aparecen al pinchar con el botón derecho del ratón en el mismo. Estas opciones tienen una gran utilidad para casos tridimensionales, pero no para los bidimensionales.

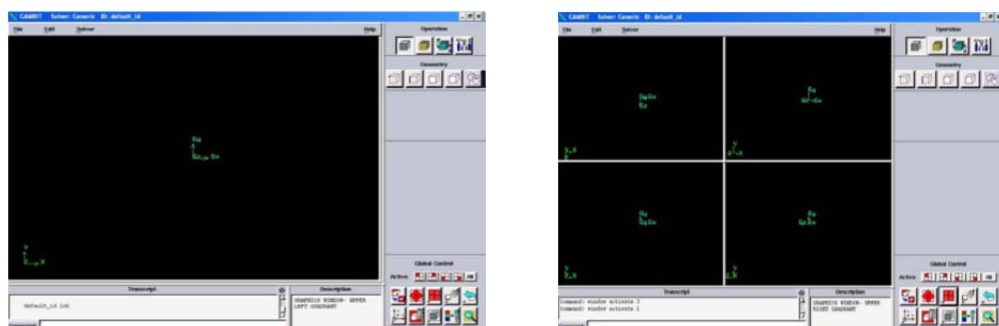




Figura 8.1.

Se pueden activar una o varias de las ventanas con los botones  y cambiar la orientación de los ejes con el botón  que, por defecto coloca la vista perpendicular al eje Z, como se acaba de decir antes, aunque se pueden seleccionar otras con el botón derecho.

El tamaño de las ventanas se ajusta moviendo con el ratón las barras que separan dichas ventanas.

Cuando una sola ventana ocupa toda la pantalla, estas barras están situadas en el borde. Si se pincha donde no se debe, se puede hacer que la zona de botones ocupe toda la pantalla:

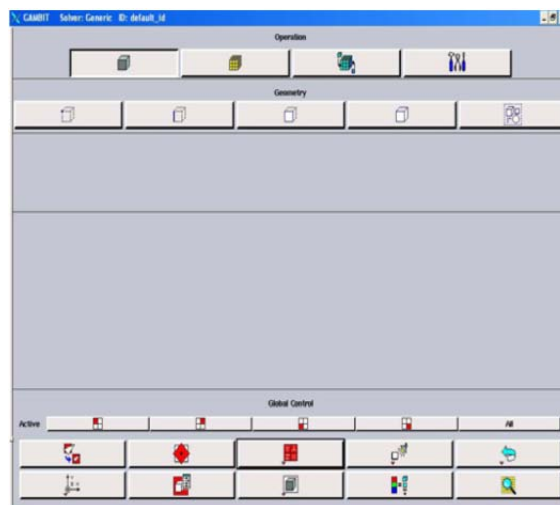





Figura 8.2.

Para volver a la vista normal hay que arrastrar con el ratón la barra vertical que está a la izquierda de la pantalla.

Definición de los puntos

Por defecto, en la parte superior derecha se encuentra el bloque de herramientas



Seleccionando el icono **Geometry**  se entra a su vez en un submenú, aquí pinchando sobre el icono puntos  (**Vertex**) y de los iconos de este, se puede crear nuevos puntos, por ejemplo clicando sobre el icono  (**Create Vertex**).

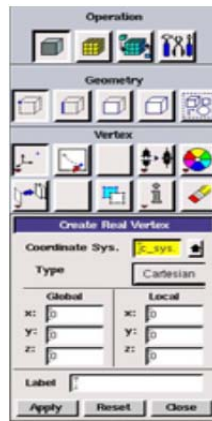


Figura 8.3.

Por defecto y salvo que se haya definido otro sistema de referencia, las coordenadas Globales y Locales coinciden. El tipo de coordenadas serán las Cartesianas.

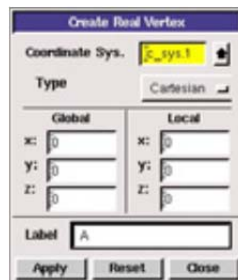





Figura 8.4.


Con este mismo método se introducen el resto de los puntos. Las unidades por defecto son metros (S.I.).

Si se comete algún error y se quiere deshacer la última operación, se puede utilizar el botón  del bloque de la parte inferior derecha.

Para poder visualizar todos los puntos, haciendo clic sobre  (*Fit to window*), que hace un zoom ajustado a lo que hay dibujado.

También se puede cambiar la vista con el ratón, pinchando en la ventana gráfica y moviendo mientras se mantiene pulsado uno de los botones. Las funciones son:

- Botón izquierdo: gira la vista en el espacio en torno a un punto. Esta función no es muy útil en 2D, pues normalmente se visualiza de frente. Si se ha movido la vista, se puede rectificar con el botón  (en la parte inferior derecha), que restablece la vista a los ejes seleccionados.

- Botón central: mueve la vista manteniendo la posición vertical y el plano.
- Botón derecho: si se mueve el ratón hacia arriba o abajo, se hace zoom reduciendo o ampliando. Si se mueve en horizontal se gira manteniendo el plano.
- Ctrl + Botón izquierdo: Hace zoom de la zona que se selecciona en un rectángulo. Por defecto no se visualizan los nombres de los puntos. Si se quiere activar esta opción puede hacerse con el botón  de la parte inferior derecha (*Specify Display Attributes*) y seleccionando los elementos (*Vertices*) y (*Label*).

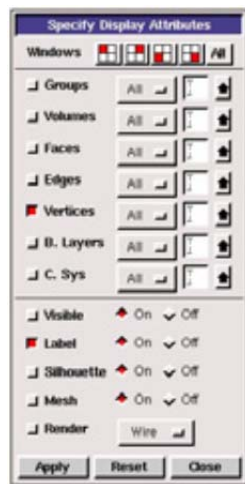


Figura 8.5.

Aunque, en ocasiones, hace más confuso el dibujo.

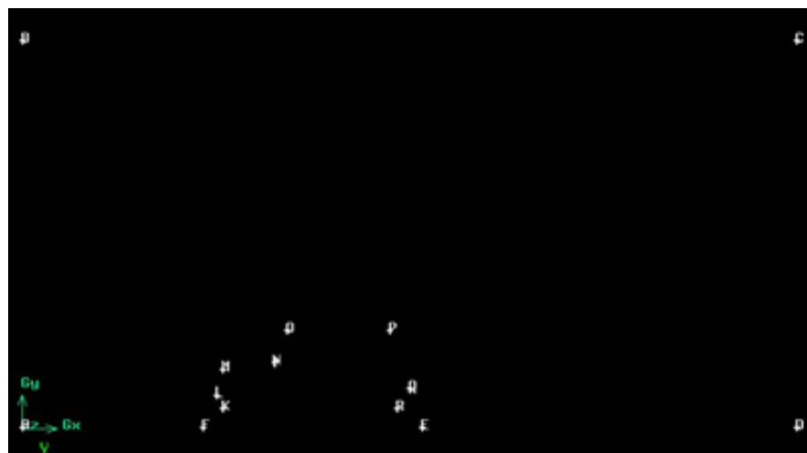



Figura 8.6.

Si no se pone ningún nombre al punto, el programa utiliza uno genérico: *vertex.n*

Para borrar un punto se utiliza el botón  (*Delete vertices*)

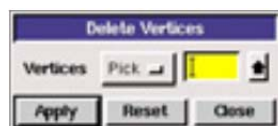



Figura 8.7.

En esta operación, como en muchas en las que hay que seleccionar puntos o algún otro elemento, se pueden hacer básicamente dos cosas: seleccionar el punto (la línea, superficie o volumen) de una lista, o seleccionarlo con el ratón. Para elegirlo en la lista de todos los puntos existentes, púlsese sobre la flecha  a la derecha del rectángulo amarillo y se abrirá la ventana:

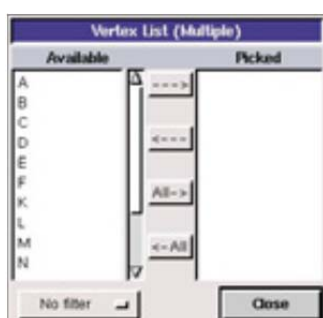



Figura 8.8.

En la lista de la izquierda se marcan los puntos y con la flecha  se seleccionan. Para seleccionar un punto con el ratón, sólo hace falta situarse encima del punto deseado y seleccionarlo con el botón izquierdo del ratón. Para deshacer la selección, utilícese la lista con la flecha contraria o bien el botón **Reset**. Con el botón **Apply** se ejecuta la operación.

Otra función que resulta muy útil es la de **información** 



Figura 8.9.

En este caso, muestra las coordenadas de los puntos que se seleccionen. La información aparece en la ventana **Transcript**, situada en la parte inferior de la pantalla, donde también van apareciendo los resultados de todas las operaciones que se realizan.

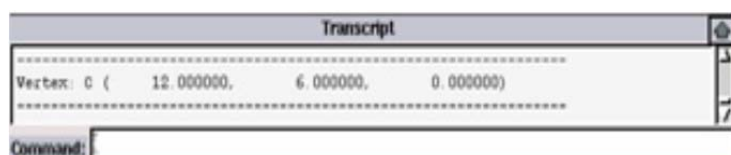



Figura 8.10.

La flecha  en la parte superior derecha de la ventana *Transcript*, hace que ésta se expanda ocupando toda la pantalla, para facilitar la visualización de la información.




Para cambiar la etiqueta de un punto (o de otros elementos) hay que pinchar con el botón derecho sobre el icono de *Color*  y seleccionar la operación *Modify Label*



Figura 8.11.

Definición de las líneas

En *Geometry* clicando sobre el icono líneas  (*Edges*), dentro de las operaciones de líneas, seleccionando crear líneas rectas  (*Create Straight Edge*)

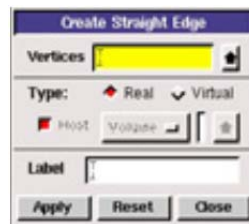


Figura 8.12.

Esta operación permite crear líneas rectas entre dos puntos. Si se seleccionan más de dos puntos, se generan líneas por cada dos puntos. Por ejemplo, para las líneas del borde se seleccionan A, B, C, D, E y F:

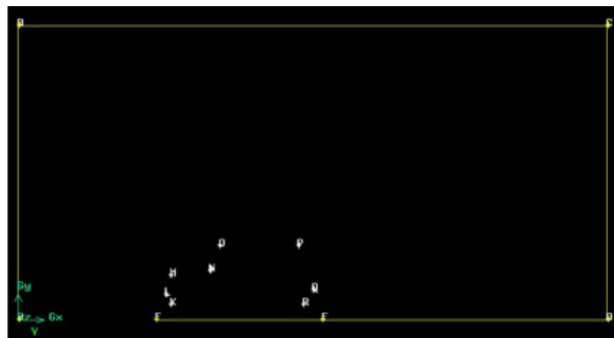


Figura 8.13.

Haciendo lo mismo con los puntos del coche:

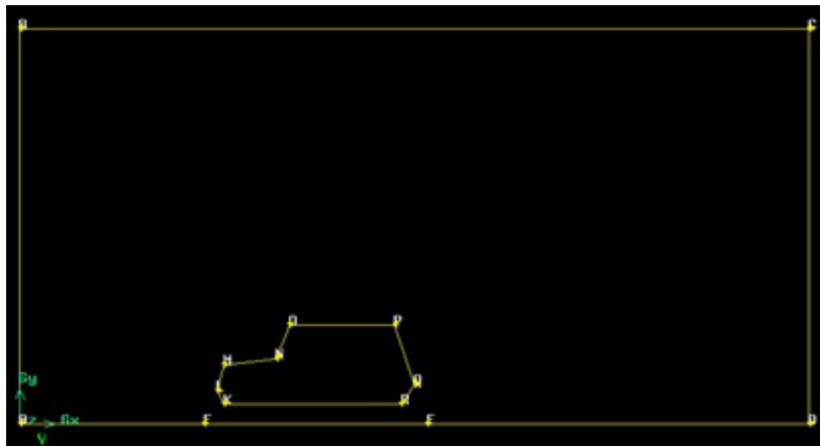


Figura 8.14.

En este ejemplo se van a utilizar solamente líneas rectas, pero si se pincha con el botón derecho en el icono **Create Straight Edge**, aparecen otras opciones de generación de líneas como por ejemplo la creación de líneas mediante “nurbs”, que ha sido muy utilizada.

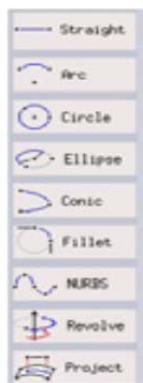


Figura 8.15.

Creación de la superficie



En **Geometry**, seleccionar **Face**  y de las opciones que aparecen, **Create Face From Wireframe** . Esta es la opción por defecto, la primera vez que se abre, pero, al igual que con las líneas, si se pincha con el botón derecho, aparecen otras opciones de generación de superficies:



Figura 8.16.

o bien, en el botón a la derecha de éste, se pueden crear fácilmente rectángulos, círculos y elipses

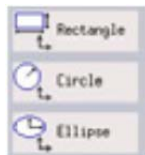


Figura 8.17.

Por ejemplo, se podría haber generado el rectángulo exterior de una sola vez, salvo que, como se verá, se necesitan los dos puntos intermedios de la parte de abajo. Con la opción **Polygon**, sin embargo, se podría haber generado las superficies sin necesidad de las líneas...

Volviendo a la creación a partir de un marco de líneas



Figura 8.18.

Se seleccionan todas las líneas del rectángulo exterior y se crea una superficie con ellas. Si se han asignado nombres a las líneas, se pueden seleccionar de la lista (también se puede ir probando, teniendo en cuenta que cuando se selecciona un elemento, su color en el dibujo pasa a rojo o rosa). De todas formas es mucho más rápido y fácil utilizar el ratón.

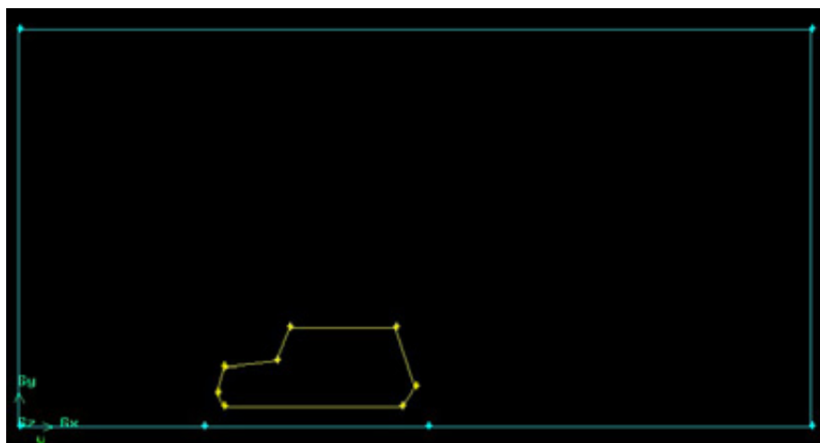


Figura 8.19.

Cuando se crea una superficie, el color de las líneas pasa de amarillo a azul.

De la misma manera se hace para el coche.

Se tienen ahora dos superficies: el rectángulo y el coche. Lo que se busca es una única superficie que defina el aire alrededor del coche, es decir la superficie exterior con un agujero con forma de coche.


Para esto se utiliza la operación de sustracción: pinchando con el botón derecho en el icono **Boolean Operations**  se escoge **Subtract Real Faces**



Figura 8.20.

En la ventana de esta operación



Figura 8.21.

Se selecciona el rectángulo exterior en **Face** y el coche en **Subtract Faces**. Se pasa de una a otra pinchando en el rectángulo blanco (el activo es amarillo). Es importante dejar sin marcar (tal y como están) las casillas de **Retain** para que desaparezcan las caras originales que, en caso contrario, darán problemas al mallar.

Aunque la operación se haya realizado correctamente, el dibujo no cambia. Se puede comprobar con el icono de **Información**, que ahora hay una única cara y que todas las líneas pasan a rojo al seleccionarla. Otra forma de visualizar la nueva cara es con la opción **Render**


Model Shaded  de los botones de la parte inferior.



Figura 8.22.

Para modelos complejos, esta opción tarda bastante, por lo que suele ser más práctico trabajar con la visualización de **Wireframe** (que es la que se ha estado utilizando). Para regresar a ella, botón derecho en **Render Model...**

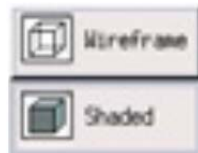





Figura 8.23.

GENERACIÓN DEL MALLADO

Definición de los nodos en las líneas

En **Operation** seleccíonese el icono de mallado  (**Mesh**). Del bloque **Mesh** seleccíonese el icono líneas  (**Edge**) y dentro de este bloque, el icono de mallado de líneas  (**Mesh Edges**)

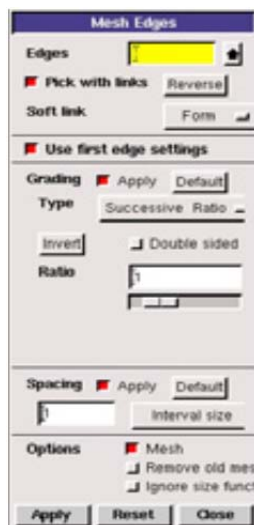


Figura 8.24.

La parte superior de la ventana



Figura 8.25.

Permite seleccionar las líneas que se van a mallar, de la misma forma que se ha hecho anteriormente.

La sección denominada *Spacing*,

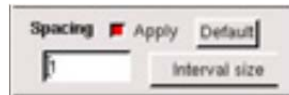


Figura 8.26.

Determina los nodos que se van a poner sobre la línea. Hay tres formas de definir el número de nodos, que se pueden seleccionar si se pincha sobre el botón *Interval size*:

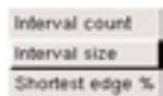


Figura 8.27.

Interval size es la opción por defecto y la que se va a utilizar en este caso. Coloca los nodos separados por la distancia marcada a la izquierda (en metros).

Interval count permite definir el número.

Shortest edge % divide la línea en función del % escrito.

Por defecto, los nodos se colocan uniformemente espaciados en las líneas. Si se quieren distribuir de forma que haya más nodos cerca de un extremo, o en la zona central, etc. Se utiliza la sección *Grading*

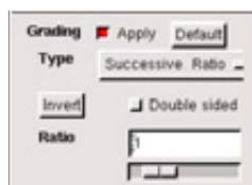


Figura 8.28.

aunque está activada por defecto, como la relación que tiene es de 1, la distribución sigue siendo uniforme.

Cuando se mallan varias líneas a la vez se forma un vínculo entre ellas, de forma que, si se quieren volver a mallar, al seleccionar una de ellas se seleccionan automáticamente todas las vinculadas.

Si no se quiere que esto suceda hay que desactivar la casilla *Pick with links*.



Figura 8.29.

Volviendo al caso del coche, se van a mallar los bordes exteriores cada 0.5 m, salvo la parte debajo del coche:

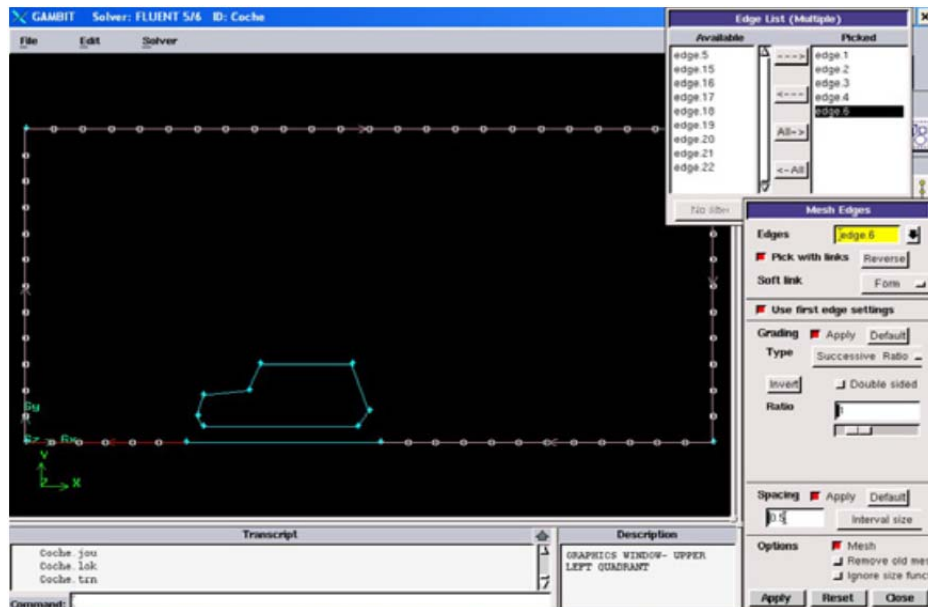


Figura 8.30.

Cuando se seleccionan las líneas, se pueden ver en blanco los nodos que se definirán. En principio los muestra con una separación de 1 m, que es el valor por defecto. Cuando se cambia el tamaño del intervalo (*Interval size*), se puede ver la nueva distribución, antes de aplicarla, apretando *Enter* o pinchando con el botón izquierdo en cualquier parte de la pantalla gráfica. Cuando se ejecuta la operación, los nodos creados aparecen en azul.

El coche y la parte de la carretera justo debajo del coche se mallan con una separación de 0.1 m.

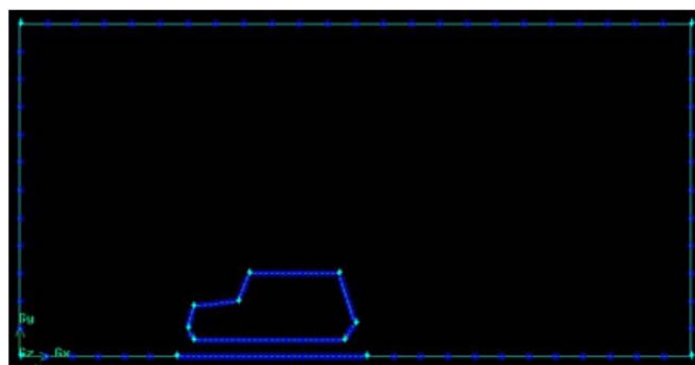




Figura 8.31.

Mallado de la superficie

Del bloque **Mesh** selecciónese el icono Caras  (**Face**) y dentro de este bloque, el icono de mallado de líneas  (**Mesh Faces**)

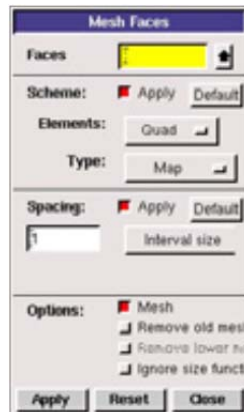


Figura 8.32.

La sección **Scheme**



Figura 8.33.

Permite elegir el tipo de celdas pinchando en el botón **Quad**

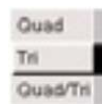


Figura 8.34.

Los mallados son más fáciles de calcular, aunque tienen el inconveniente de que se adaptan mal a geometrías que no sean básicamente rectangulares. Para este caso se van a utilizar celdas triangulares (opción **Tri**).

La sección **Spacing**



Figura 8.35.

Permite generar el mallado de las caras sin haber mallado las líneas con anterioridad. El mallado que se crea tiene un tamaño uniforme fijado por el valor del **Interval size**. En este caso no se va a utilizar para poder poner celdas más pequeñas alrededor y por debajo del coche. Esta sección debe estar desactivada.

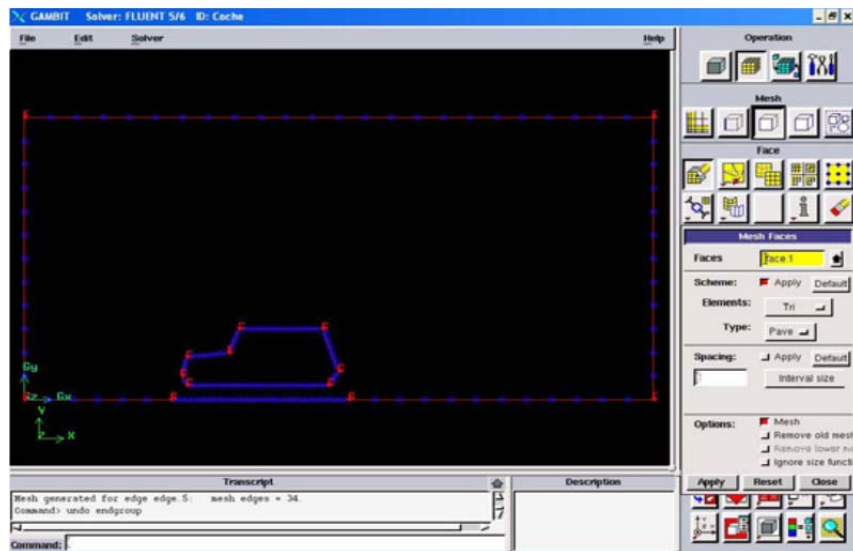


Figura 8.36.

Al aplicar la operación se obtiene:

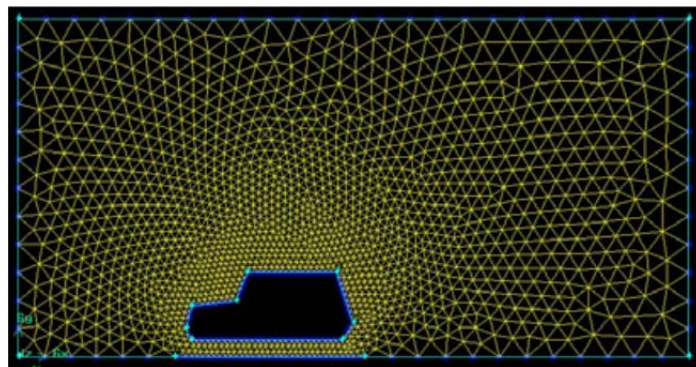


Figura 8.37.

La calidad del mallado tiene una gran importancia para la solución del problema. Las celdas deben ser lo más regulares posible: las triangulares con ángulos cercanos a 60° y las cuadrangulares a 90° .

Un mallado con celdas muy deformadas no sólo dará malos resultados alrededor de estas celdas, sino que se puede dificultar o impedir la convergencia del cálculo.

En este caso, la zona más comprometida es la cercana a la carretera cuando se pasa de una separación de 0.5 a 0.1 m.

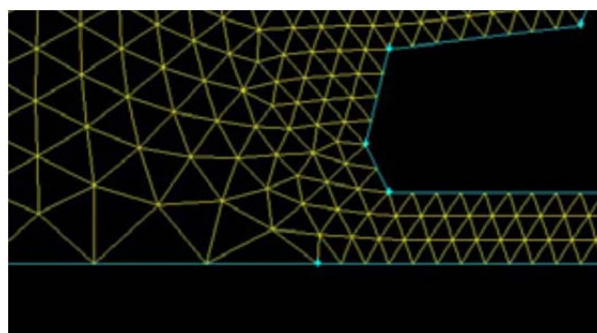


Figura 8.38.

Se puede mejorar el mallado utilizando un tamaño uniforme de las celdas en todo el dominio (de 0,1 en este caso), pero eso hace que el número de celdas sea mayor y por tanto se tarde más en calcular.

Otro sistema más elegante, aunque más trabajoso consiste en utilizar la función de graduación en la distribución de los nodos de las líneas.

Se puede comprobar la calidad del mallado con la operación **Check**, a la que se accede pinchando con el botón derecho sobre el icono de información

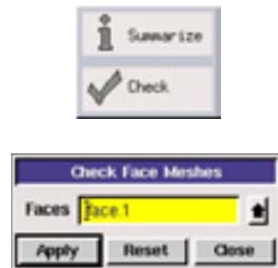


Figura 8.39.

Al seleccionar la cara y aplicar la función, aparece la información en la ventana **Transcript** (conviene maximizarla para poder visualizar todo...)

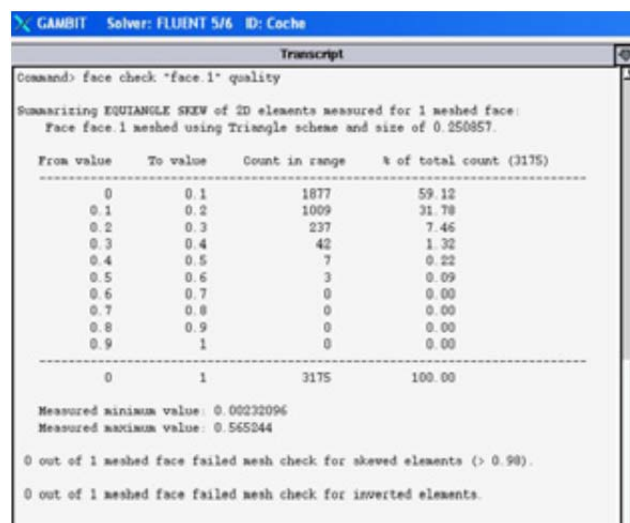




Figura 8.40.

El **Skew** es una medida de la calidad de las celdas. Vale 0 para celdas muy regulares y 1 para las muy deformadas. En casos 2D es conveniente que las celdas estén por debajo de 0.6 y en 3D por debajo de 0.8.

Condiciones de contorno

Para acabar con el mallado hay que de marcar la superficie que se va a considerar como zona de fluido y las líneas donde se van a definir las condiciones de contorno.

En Operación selecciónese **Zones**  y de esta, **Specify Continuum Types** . En esta sección se especifica la superficie de fluido.

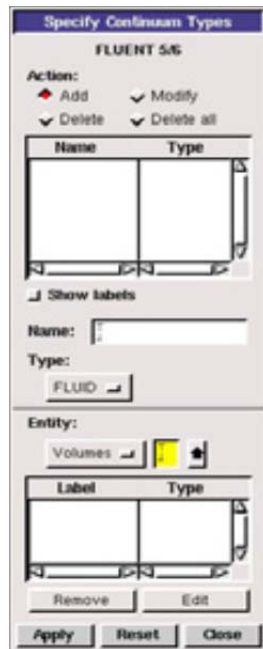


Figura 8.41.

En la sección **Entity**, hay que seleccionar **Faces** en vez de **Volumes**, porque el caso es 2D. Pinchando en el botón **Volumes**:



Figura 8.42.

Seleccionando la cara, y poniendo un nombre, por ejemplo **Aire**,

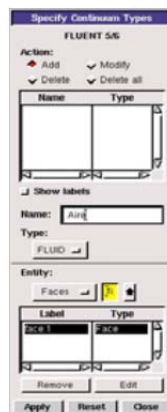


Figura 8.43.

Al aplicar, aparece la definición en la lista superior

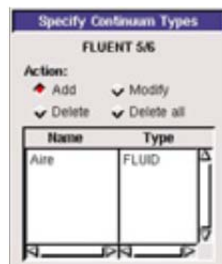


Figura 8.44.

Pasando ahora a Specify Boundary Types

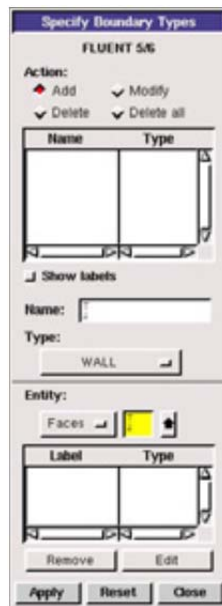


Figura 8.45.

En la sección **Entity**, hay que seleccionar **Edges** en vez de **Faces**, pinchando en el botón **Faces**:



Figura 8.46.

Las líneas que se van a fijar como condiciones de contorno son:

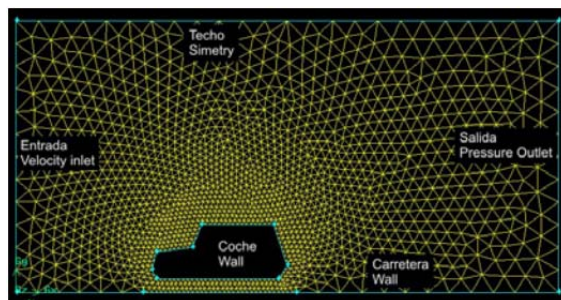


Figura 8.47.

- La línea vertical de la izquierda como la entrada de aire, donde se fijará la velocidad.
- La línea vertical de la derecha como la salida, con presión constante.
- Las tres líneas inferiores que componen la carretera como una pared.
- Las líneas que componen el contorno del coche como otra pared.
- La línea horizontal superior como simetría. Esta condición es muy parecida a una pared, no deja pasar el flujo a su través, pero con la diferencia de que no tiene rozamiento.

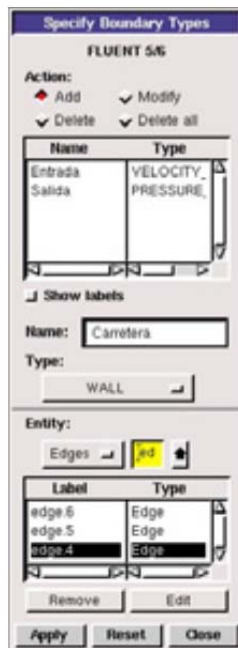


Figura 8.48.

Para cada condición hay que seleccionar la o las líneas que la componen (aparecen en la lista inferior, se pueden deseleccionar en la lista emergente o con el botón **Remove**), hay que ponerle un nombre y seleccionar un tipo. El tipo por defecto es **Wall**, se cambia pinchando en el botón **Wall**.



Figura 8.49.

Un error muy común consiste en haber olvidado definir el **Solver** (en el menú superior) como Fluent5/6, con lo que los tipos de condiciones de contorno son los de un solver genérico y solo aparecen:

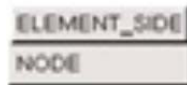


Figura 8.50.

Una vez definidos todos los bordes, el nombre y tipo aparece en la lista superior



Figura 8.51.

Se pueden comprobar pinchando sobre cada una de ellas, con lo que las líneas que la componen aparecen en la lista inferior y se colorean de rojo/rosa en la ventana gráfica. Otro error común es olvidarse de cambiar **Entity**, y seleccionar **Faces** en vez de **Edges**, con lo que se definirá toda la superficie como condición de contorno. Si se ha hecho esto, al revisar las condiciones aparecerán en rojo/rosa todas las líneas de la superficie.

Para cambiar una condición de contorno, se utilizan las opciones **Modify** o **Delete** en la sección **Action**.

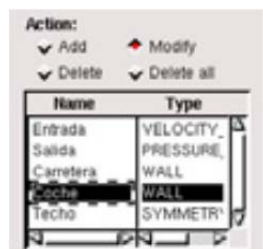


Figura 8.52.

8.2.2 FLUENT

El Fluent es un programa muy sencillo que consta de una ventana principal en la que expone los resultados numéricos. Simplemente hay que establecer las condiciones del fluido con las que se quiere trabajar y dejar que el programa haga las iteraciones. Una vez el programa haya hecho las iteraciones necesarias y se haya comprobado que la gráfica de residuales haya convergido, se sacan por pantalla las diferentes imágenes de velocidades, presiones, etc., que se quieran estudiar.

Se hicieron algunas pruebas sencillas con la motocicleta en 2D y con el cubo en 3D para afianzar lo aprendido.

TUTORIAL

Arrancar y leer el mallado en FLUENT

Al abrir el FLUENT aparece la ventana donde se elige la versión bidimensional o tridimensional.



Figura 8.53.

En este caso se escoge 2d. Las versiones 2ddp y 3ddp se diferencian de las 2d y 3d en que utilizan doble precisión; requieren más tiempo de cálculo, por lo que no es conveniente usarlas si no es necesario.

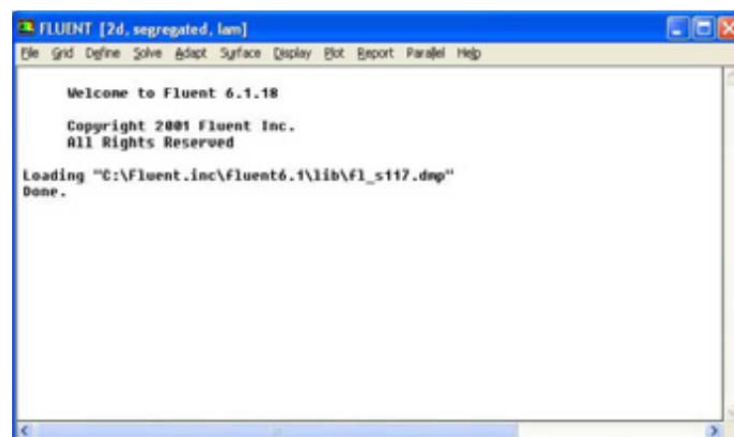


Figura 8.54.

La ventana principal del programa es de texto. En ella se pueden escribir comandos y aparecen los resultados de las operaciones. En la práctica no es fácil que se necesite utilizar los comandos pues casi todas las opciones se pueden manejar con el menú de la parte superior.

Para leer el mallado se utiliza:

File

Read

Case ...

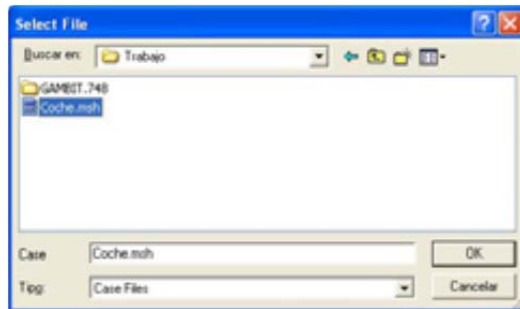


Figura 8.55.

Y en la ventana se puede leer el resultado:

> Reading "C:\Trabajo\Coche.msh"...

1675 nodes.

24 mixed symmetry faces, zone 3.

75 mixed wall faces, zone 4.

52 mixed wall faces, zone 5.

12 mixed pressure-outlet faces, zone 6.

12 mixed velocity-inlet faces, zone 7.

4675 mixed interior faces, zone 9.

3175 triangular cells, zone 2.

Building...

grid,

materials,

interface,

domains,

zones,

default-interior

entrada

salida
carretera
coche
techo
aire
shell conduction zones,
Done.

En este listado aparecen, entre otros, el número de celdas y el nombre de las condiciones de contorno que se impusieron en GAMBIT.

Para comprobar el mallado y las condiciones de contorno se puede visualizar el mallado:

Display

Grid

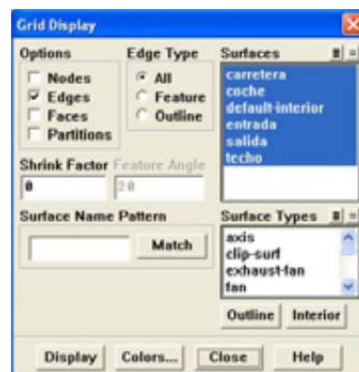


Figura 8.56.

Al apretar el botón *Display* se abre una ventana de dibujo

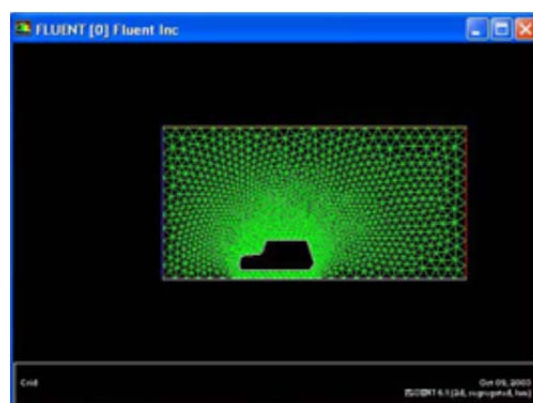


Figura 8.57.

En la sección **Surfaces** de la ventana de **Grid Display** se pueden ver las zonas definidas en el caso. La zona denominada **default-interior** está generada automáticamente por el programa y está compuesta por las líneas del mallado interior. Por defecto, las líneas tienen asignado un código de color en función del tipo de zona o condición de contorno:

- Azul: velocity inlet
- Rojo: pressure outlet
- Blanco: 84all
- Amarillo: simetry
- Verde: celdas interiores

Cuando se dibuja el mallado, se ven únicamente las zonas que están seleccionadas. Esta opción permite comprobar que las condiciones de contorno son correctas. Por ejemplo, si se deselecciona el coche:

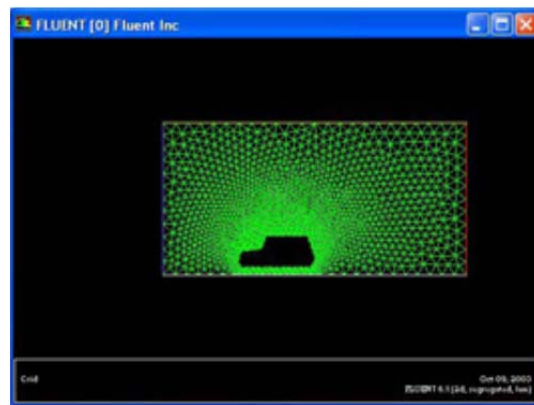
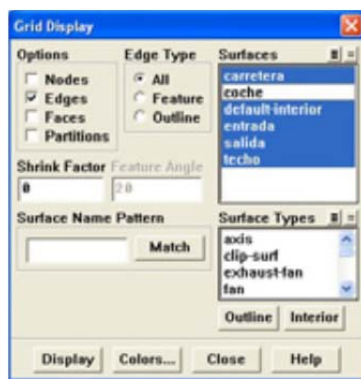



Figura 8.58.

Los botones  permiten seleccionar y deseleccionar en bloque todas las zonas.

Del menú **Grid**

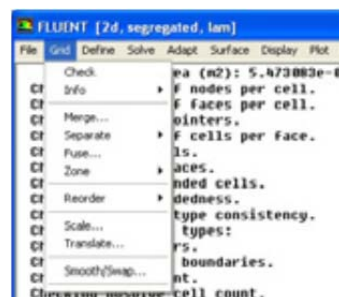


Figura 8.59.

Son interesantes las opciones **Check** que realiza una comprobación de la consistencia del mallado; **Info** que da el número de celdas y **Scale...** que permite cambiar el tamaño del mallado.

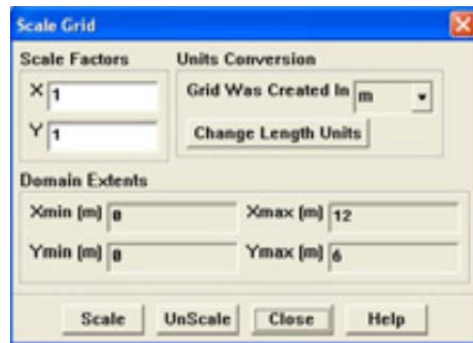


Figura 8.60.

Esta última es “muy útil” si el mallado no se ha hecho en metros.

Definir los modelos

En el menú *Define*, la primera opción es *Models*



Figura 8.61.

La opción *Solver*

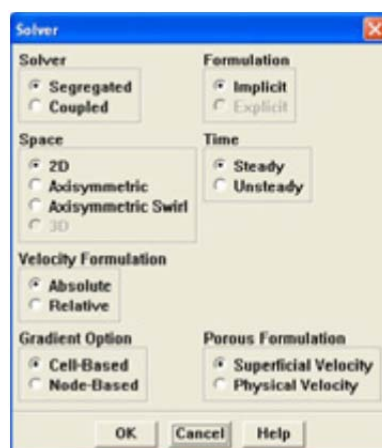


Figura 8.62.

Básicamente permite elegir:

- **Solver** (algoritmo de resolución): segregado o acoplado. La diferencia entre ellos es la forma como linealizan y resuelven las ecuaciones discretizadas. La opción por defecto es Segregado, que es adecuado para flujos subsónicos, mientras que el Acoplado es mejor para flujos supersónicos.

- **Space**: por defecto el caso se resuelve como bidimensional, considerando un ancho constante de valor unidad (1 metro) para las variables que lo requieren (caudal, fuerza...).

La opción **Axisymmetric** permite resolver de forma bidimensional algunos casos tridimensionales que tienen un eje de simetría.

- **Time: Steady** para casos estacionarios, cuya solución no cambia con el tiempo, y **Unsteady** para los no estacionarios.

Para el caso que se está resolviendo, se mantienen los valores por defecto.

La opción **Viscous**



Figura 8.63.

Permite elegir el modelo de turbulencia. En este caso se utilizará el modelo k-epsilon con los parámetros por defecto:

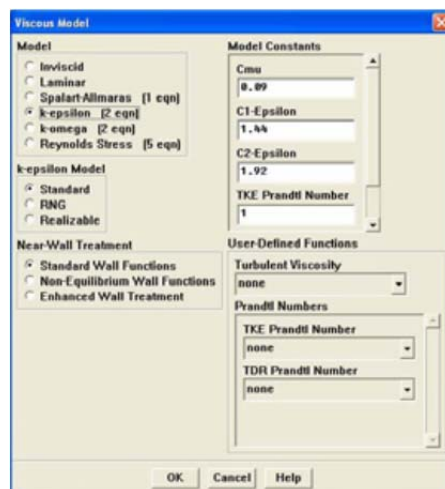


Figura 8.64.

Dentro de la sección de modelos, están disponibles otras opciones para simular flujos más complejos en los que intervenga la radiación, varias fases o especies, etc.

Condiciones de contorno

Se definen las condiciones de contorno en:

Define

Boundary Conditions...



Figura 8.65.

En este cuadro de dialogo aparecen a la izquierda las zonas y bordes que se han definido en el GAMBIT, y a la derecha los tipos posibles para el elemento elegido, resaltado en azul el tipo seleccionado. La zona *aire* es toda la superficie mallada y puede ser fluido y sólido, estando definida como fluido. Si se pulsa el botón *Set...* se pueden cambiar los valores correspondientes:

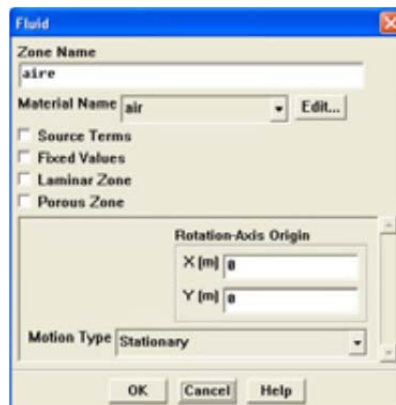


Figura 8.66.

En *Zone Name* se cambia el nombre de la región. En *Material Name* se elige el tipo de fluido que se va a utilizar en el cálculo. Sólo están disponibles los fluidos que se hayan definido en *Materials*.

El resto de las zonas definidas son líneas del contorno. La entrada, por ejemplo, está definida como *velocity-inlet*

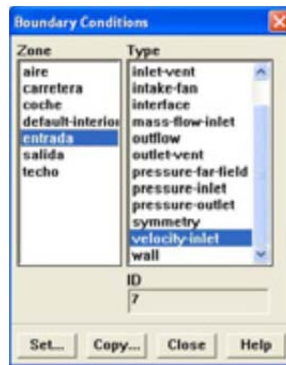


Figura 5.67

En la ventana de la derecha aparece la lista de todas las posibles condiciones de contorno que se pueden aplicar a las líneas de contorno. Se puede cambiar el tipo de una condición pinchando en un tipo nuevo (si se han elegido correctamente en GAMBIT no hace falta cambiarlas).

Los tipos más utilizados son

- **Velocity inlet:** se usa como entrada del flujo, fija la velocidad de entrada en ese borde
- **Pressure inlet:** es otro tipo de entrada, fija la presión total, suma de presión dinámica (velocidad) y estática.
- **Pressure outlet:** condición de salida, define el valor de la presión estática en ese borde.
- **Outflow:** también de salida, pero no fija la presión ni la velocidad. Aunque el funcionamiento es más complejo, se puede tomar como una condición que fuerza al flujo a salir en perpendicular al borde.
- **Wall:** condición de pared, la velocidad en este contorno es cero, de forma que el flujo no la atraviesa ni hay deslizamiento (generando el efecto del rozamiento, capa límite...)
- **Symmetry:** línea o plano de simetría. Se utiliza cuando la geometría tiene un plano de simetría para poder simular únicamente la mitad. En la práctica se comporta como una pared sin rozamiento, característica que se aprovecha en este caso.

En cada condición se pueden fijar distintos valores de algunas variables, entrando con el botón **Set....** Concretamente:

Entrada

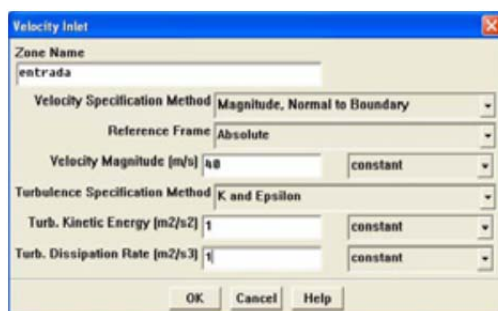


Figura 8.68.

En *Velocity Specification Method* se puede elegir entre:

- *Magnitude, Normal to Boundary*: se especifica el valor de la velocidad, la dirección es normal al contorno.
- *Magnitude and Direction*: valor de la velocidad y vector de dirección, se usa cuando la velocidad no entra de forma perpendicular en todo el contorno.
- *Components*: componentes del vector velocidad, muy similar a la anterior.

Se va a utilizar el primero de los métodos, con una magnitud de la velocidad de 40 m/s (lo que supone una velocidad del coche de 144 Km/hora). Los valores de la energía cinética turbulenta y de la relación de disipación turbulenta, que definen la turbulencia del flujo de entrada, se dejan por defecto.

Nota: si no aparece esta sección es porque no se ha elegido bien el modelo de turbulencia.

Salida

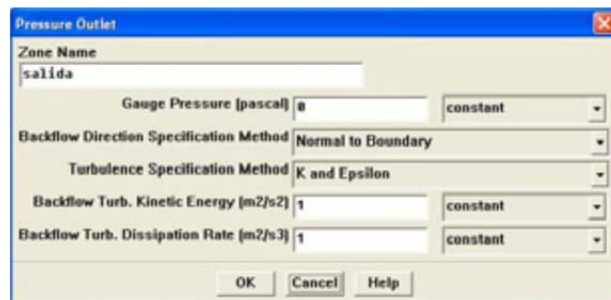


Figura 8.69.

En esta condición se fija el valor de la presión estática a la salida. Hay que poner este valor como una presión relativa (*Gauge*) a la atmosférica, definida de *Operating Conditions*. Como lejos del coche, la presión es atmosférica, en esta condición se deja un valor de cero. El resto de los parámetros son para el caso de que haya flujo reverso por este borde, y se dejan por defecto.

Coche



Figura 8.70.

En las condiciones de pared aparecen una serie de menús a los que se accede con las pestañas de la parte superior. Ahora el único menú activo es el de *Momentum*, donde se puede definir si la pared está quieta o se mueve, y los valores de la rugosidad en la pared. Como se está resolviendo el caso desde una perspectiva relativa (el coche quieto y el aire avanzando hacia él), esta pared no se mueve (*Stationary Wall*). La altura de la rugosidad se ha tomado como de una décima de milímetro, la constante de rugosidad se deja en 0.5, que es adecuada para la mayoría de los casos.

Techo

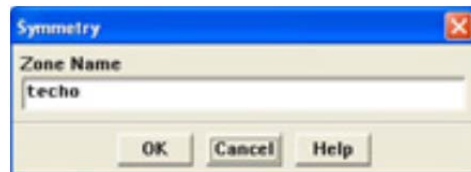


Figura 8.71.

En el techo se ha impuesto una condición de simetría, y no hay ningún parámetro que fijar, sólo se puede cambiar el nombre.

Default-interior



Figura 8.72.

En la lista de condiciones de contorno aparece también esta zona, que no se ha definido en GAMBIT. Es creada de forma automática por el programa y está compuesta por todas las líneas interiores del mallado.

Discretización y relajación

El tipo de discretización y los coeficientes de relajación se definen en el menú

Solve

Controls

Solution...

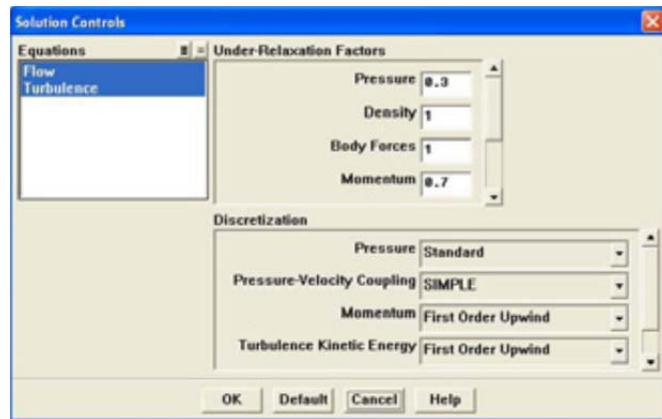


Figura 8.73.

El tipo de discretización por defecto es **Standard** en presión, de primer orden en las ecuaciones de cantidad de movimiento y turbulencia, y con el método **SIMPLE** de acoplamiento entre la presión y velocidad. Esta discretización facilita la convergencia de la solución aunque el resultado final puede tener un error apreciable. Cuando se requieran resultados no solamente cualitativos, hay que procurar utilizar discretizaciones de segundo orden.

Los factores de relajación controlan directamente el proceso iterativo. De una forma simplificada puede verse el proceso de cálculo como la resolución de un sistema de ecuaciones con tantas variables como celdas. Estos sistemas no admiten un método de resolución directo, y se utiliza un procedimiento iterativo: se parte de unos valores arbitrarios de las variables, se aplica el sistema y se obtiene un resultado un poco mejor, se aplica el sistema a estos nuevos valores obteniéndose un resultado algo mejor que el anterior, etc. El proceso continúa hasta que la diferencia entre el resultado utilizado y obtenido es suficientemente pequeño y se acepta la solución como correcta. En la práctica el proceso es más complejo, entre otras cosas porque el sistema de ecuaciones discretizado no es lineal. Para poder resolverlo se linealiza, pero para que la solución final sea correcta, durante el proceso iterativo es necesario ir ajustando el sistema. Este ajuste hace que, si en el proceso iterativo se utilizan directamente los resultados de la iteración anterior, los nuevos resultados, en vez de estar más cerca de la solución, están más lejos: el cálculo diverge. Para corregir esta tendencia, en vez de utilizar directamente los resultados hallados, se hace una media con éstos y los anteriores. Cuanto más peso tengan los resultados anteriores, más estable será el proceso, aunque también harán falta más iteraciones para llegar a la solución definitiva. Los factores de relajación (under-relaxation en inglés) indican el peso de la nueva solución para cada variable; cuanto más pequeños, más estable. Los valores por defecto son adecuados para la mayoría de los casos cuando se utiliza una discretización de primer orden; si en algún caso no se tiene una convergencia satisfactoria, una de las primeras opciones es utilizar valores de relajación más pequeños.

Para el caso que se está resolviendo se utilizará tanto la discretización como los valores de relajación por defecto.

Residuos

El residuo de cada variable es la diferencia entre el valor de la solución nueva y la anterior.

Cuando los residuos toman un valor suficientemente bajo, se considera que la solución ha convergido.

Para que los residuos tengan valores significativos, independientes de las magnitudes de las variables en el caso en concreto, se utilizan residuos escalados: la suma del residuo de la variable en todas las celdas, dividido por un factor de escala representativo del flujo de la variable en el dominio.

La visualización de los residuos y el criterio de convergencia se fijan en:

Solve

Monitors

Residual...

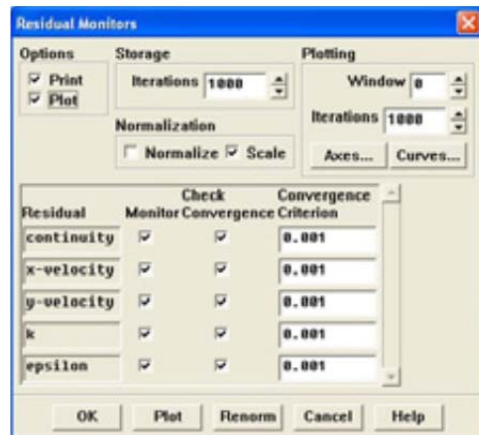


Figura 8.74.

La opción **Print** en la parte superior izquierda hace que, durante el cálculo, se escriban los residuos en la ventana de comando. La opción **Plot** (justo debajo de la de Print) representa estos valores en un gráfico. El criterio de convergencia, que por defecto está fijado en 0.001, detiene el proceso iterativo cuando los residuos escalados de todas las variables han caído tres órdenes de magnitud. Aunque por el momento se va a mantener, este valor es un poco escaso para la mayoría de las simulaciones, y para obtener buenas soluciones hay que bajarlo a 0.0001 o 0.00001, incluso quitarlo. Cuando se utiliza precisión simple es difícil obtener convergencias mejores que éstas, pues se entra en la zona de los errores de redondeo en los cálculos. El botón **Plot** no tiene utilidad en este momento porque no se ha realizado ninguna iteración; las funciones de esta ventana se aplican con el botón **OK**.

Inicialización de la solución

Para comenzar el cálculo, el programa necesita unos valores iniciales de las variables. Éstos se establecen en:

Solve

Initialize

Initialize...

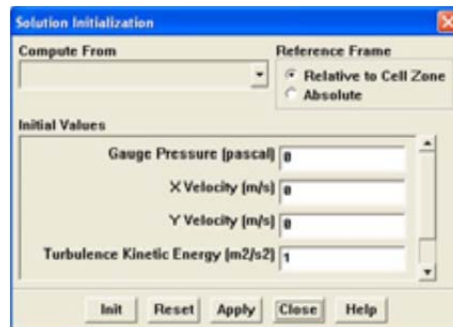


Figura 8.75

Para la mayoría de los casos, los valores a los que se inicializan las variables no son muy importantes y se pueden dejar por defecto. Sin embargo, cuando se tiene flujo supersónico o se utiliza alguno de los modelos avanzados (Multifase...), puede ser necesario inicializar las variables a valores lo más cercanos posible a la solución definitiva para asegurar la convergencia del cálculo.

Esta opción se aplica con el botón *Init* y se cierra la ventana con *Close*.

Cuando se inicializa el caso por primera vez, el programa crea el espacio de memoria necesario para guardar los valores de las variables en todas las celdas y pone en ellos los valores de inicialización.

Cuando se itera, en este espacio se van guardando las sucesivas soluciones. Si después de realizar alguna iteración se vuelve a inicializar (si, por ejemplo, se ha visto que la solución no es la deseada, se ha cambiado alguna condición o parámetro y se quiere volver a empezar el cálculo desde el principio...), aparece el mensaje

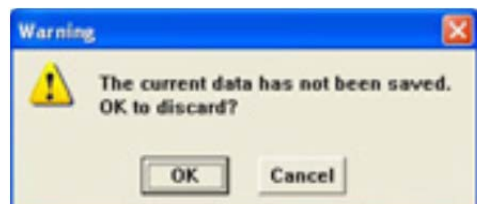


Figura 8.76.

que indica que se va a borrar la solución que se tenía y se van a inicializar las variables. Este mismo mensaje aparece si se pincha dos veces seguidas sobre el botón *Init*, pero antes de haber iterado no tiene mayor importancia (pulsar *OK...*).

Iteración

El cálculo se realiza con:

Solve

Iterate...

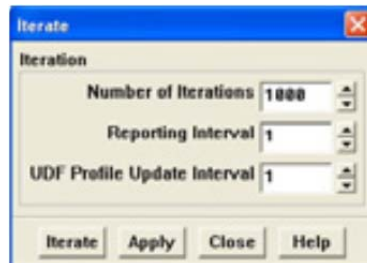


Figura 8.77.

En **Number of Iterations** se pone el número máximo de iteraciones que se quiere realizar, y se comienza con el botón **Iterate**.

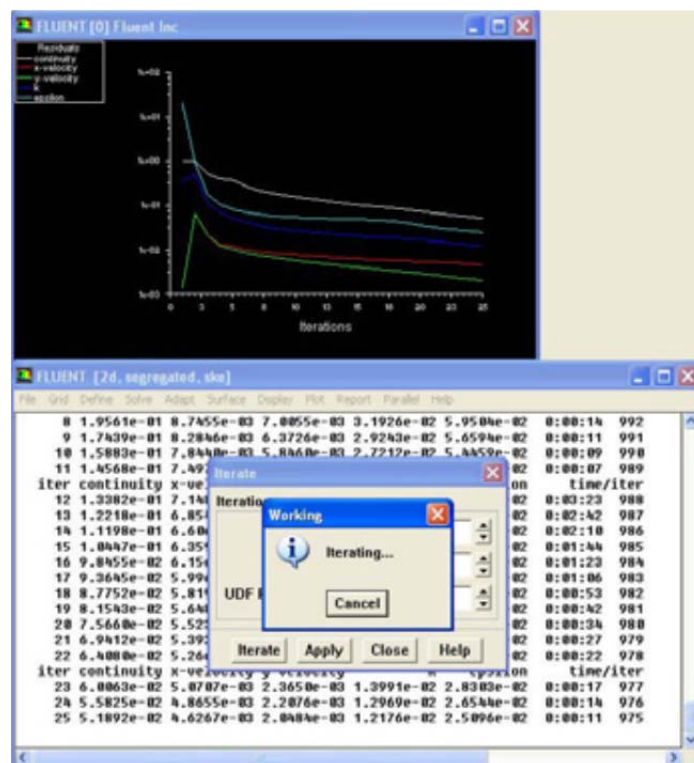


Figura 8.78.

Durante la iteración, los residuos se van escribiendo en la ventana de comandos y se representan en un gráfico (si se ha activado **Plot** en **Residuals**). Se puede detener el proceso con el botón **Cancel**, aunque después de apretarle hay que esperar a que concluya una iteración (en este caso no es apreciable, pero casos de gran tamaño pueden tardar varios segundos o algún minuto en cada iteración). Si se detiene, se puede continuar la iteración pulsando de nuevo el botón **Iterate**; si no se reinicializa la solución, se continúa en el mismo punto en que se dejó.

El cálculo concluye cuando se alcanza el número de iteraciones fijadas o se cumple el criterio de convergencia, en este caso que todos los residuos sean menores que 0.001

```

86 1.1368e-03 6.7481e-05 3.2201e-05 5.3357e-04 8.2730e-04 0:00:16 914
87 1.0652e-03 6.3833e-05 3.1140e-05 4.9896e-04 7.7632e-04 0:00:13 913
88 1.0044e-03 6.1023e-05 3.0547e-05 4.7509e-04 7.4736e-04 0:00:10 912
iter continuity x-velocity y-velocity k epsilon time/iter
! 89 solution is converged
89 9.6931e-04 5.7466e-05 2.9418e-05 4.5250e-04 7.0815e-04 0:00:08 911

```

Figura 8.79.

En esta simulación el número de iteraciones es pequeño y se completa en muy poco tiempo. Una simulación típica puede tener varios cientos de miles de celdas (o algún millón), requerir miles de iteraciones y tardar en realizarse varios días...

Como puede verse en el gráfico de los residuos, después de unas primeras oscilaciones, los residuos disminuyen de forma gradual y alcanzar la convergencia es cuestión de realizar un número suficiente de iteraciones. Este comportamiento se busca en todas las simulaciones, pero no siempre es fácil de conseguir. En casos complejos, para conseguir una buena convergencia hace falta tener muy buen conocimiento del fenómeno fluidodinámico y una gran experiencia de CFD. Como regla general, una mala convergencia puede ser achacada a una de estas tres causas:

- Un mal mallado, es decir, un mallado en el que haya celdas muy deformadas (con unas pocas es suficiente). Esta es la causa más frecuente.
- Condiciones de contorno incorrectas o mal situadas.
- Estar utilizando discretizaciones de segundo orden o modelos avanzados. En estos casos se puede conseguir algo a base de reducir la relajación o realizar la simulación de forma no estacionaria.

De todas formas, si en este ejercicio se tienen problemas de convergencia, la razón es que no se ha hecho en condiciones.

8.2.3 TGRID

El TGrid es un programa muy parecido al Fluent a nivel visual. El uso de esta herramienta surgió como solución a los problemas de mallado que surgían, por lo que el proceso de aprendizaje se realizó directamente sobre las motocicletas finales.

El uso que se le ha dado ha sido como transición entre el Gambit y Fluent para poder crear un mallado volumétrico, debido a que no ha sido posible poder crearlo con el Gambit generando los volúmenes geométricos correspondientes.

Si no es posible crear los volúmenes para a su vez crear un mallado volumétrico en Gambit, se puede crear una malla superficial que exportándola y procesándola en el TGrid, se puede llegar a tener este mallado volumétrico deseado. Ya que el Fluent sólo es capaz de procesar mallados volumétricos.

8.3 Pre-procesado de las motocicletas en el GAMBIT

8.3.1 Geometría a analizar

Una vez se recibieron las piezas CAD de las motocicletas creadas por parte de los técnicos de ArianeTech se procedió a la “limpieza” y unión de las diferentes partes. Las piezas se recibieron en formato STEP (.stp) e IGES (.igs).

La “limpieza” de las piezas consiste en la simplificación de algunas geometrías que no van a afectar al estudio aerodinámico. En algún caso de fuerza mayor en el que el mallado de esas zonas no era posible y en el que su modificación sí que pudiese afectar al estudio, se ha intentado mantener la geometría lo más fiel posible a la motocicleta inicial.

La primera motocicleta que se recibió fue la Ariene2 2012, se recibió en varias piezas. Dado que la motocicleta estaba en diferentes archivos, se empezó por cargar pieza a pieza e ir limpiándolas a medida que se iban importando, ya que así se facilitaba la visión de las piezas y secciones conflictivas.

Ejemplo:

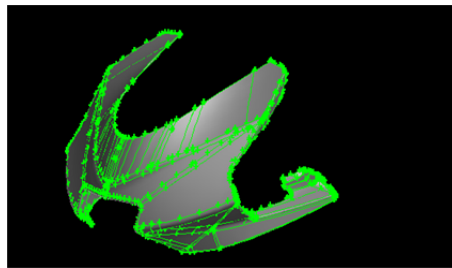


Figura 8.80.

8.3.2 Adecuación de la geometría para su tratado en CFD

En los programas de CFD no es posible analizar un objeto en 3D creado por superficies abiertas, ya que funcionan por mallas volumétricas. Esto significa que toda la moto tiene que estar formada de forma volumétrica. Como se podrá ver en la *figura 8.1*, las motocicletas se entregaron en diferentes piezas. En el caso de la Ariane2 se entregaron las piezas con grosor, como se encontrarían en la moto real. En cambio, en la BETA, dado que se trataba de una motocicleta cuya digitalización se realizó por el método de escaneado laser, el carenado de ésta se recibió de una sola pieza y sin espesor. A las piezas del carenado hay que añadirle, las ruedas, el depósito de gasolina, el chasis y el basculante. Las partes del carenado que permanecen abiertas no sirven como modelo para hacer simulaciones. Para solucionar este problema existen dos opciones:

- Darle espesor a todo el carenado.
- Unir todas las superficies creando un único bloque cerrado, suprimiendo así todos los flujos internos.

Mantener el espesor de las piezas de la Ariane2 sólo crearía más dificultades en el mallado del ambiente alrededor de la moto, además de que crearían flujos internos, que no son tan importantes al hacer un estudio comparativo, que harían más difícil cualquier modificación que hubiese que hacer a la superficie de la motocicleta para simplificar el mallado.

Debido a esto se decidió que lo mejor era trabajar únicamente con una carcasa exterior, ya que, para que la comparativa fuese lo más fiable posible, las tres motos debían estar en las mismas condiciones y no se disponían de todos los datos internos, ni de grosor de la BETA.

Por otra parte, la geometría debe estar completamente unida y conectada, sin ningún tipo de abertura para que al mallar no aparezcan zonas conflictivas. Las diferentes piezas no pueden estar entrelazadas entre sí. Para evitar esto, se optó por crear un único sólido hueco a modo de cascarón.

Una vez que se recibieron las diferentes piezas para poder empezar a trabajar, se empezaron a importar una por una. Una vez conseguido esto, se empezó con la simplificación y limpieza de estas de la siguiente forma:

- Eliminación del volumen sin eliminar las geometrías inferiores.
- Eliminación del grosor de las diferentes piezas que lo tuvieran.
- Limpieza de las geometrías para la simplificación del mallado.
- Unión de las diferentes piezas para crear una única geometría cerrada a modo de cascarón.

En lo que se refiere a la limpieza de las geometrías es proceder a la unión de las diferentes superficies de las que están compuestas las diferentes piezas, o realizar el llamado “merge”, ya que al ser piezas importadas de programas CAD, si se quiere que tengan una buena precisión y fidelidad con la realidad, el número de las superficies que habrá que crear será mayor.

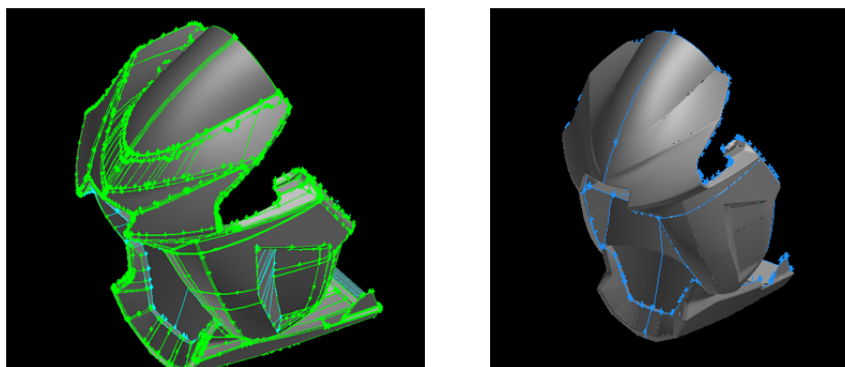


Figura 8.81: Limpieza de la Ariane2 2012.

En cuanto al último punto mencionado, la unión de las diferentes piezas se tiene que realizar de tal forma que no haya ninguna zona abierta. Por lo que en estas zonas habrá que realizar una serie de pequeñas modificaciones en las geometrías para poder conseguir este objetivo.

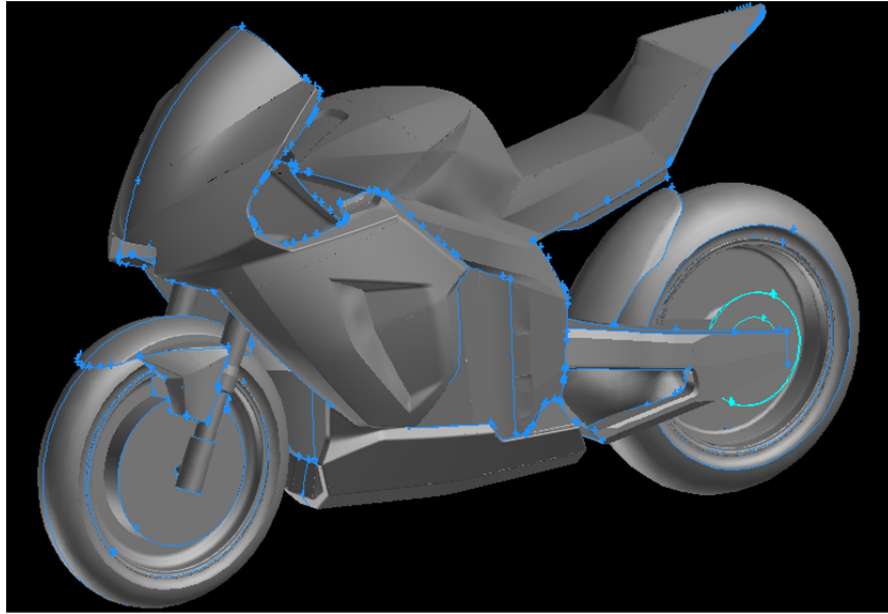


Figura 8.82: Superficies creadas para unir el deposito, y chasis con la carena.

El trabajo realizado en el modelo de la BETA es algo diferente debido a la forma en la que se entregaron las geometrías para su procesado. El trabajo consiste en:

- Supresión de la mitad derecha de la geometría por simetría de la carena.
- Eliminación de pequeñas superficies que se encontraban en la parte central de la geometría para luego poder utilizar el comando “simetry” para ahorrar memoria.
- Limpieza de las diferentes superficies.
- Unión de las piezas para crear el modelo tridimensional.

La unión de las piezas del carenado de la BETA supuso un trabajo algo diferente puesto que la forma de creación del modelo CAD de ésta fue diferente a las anteriores. En este caso al hacer el “merge” de las piezas había que comprobar que no hubiese superficies superpuestas ya que al pasar del CATIA al GAMBIT, se crean algunas superficies automáticamente. Por lo que en varias ocasiones hubo que crear puntos sobre las líneas de dichas superficies para eliminarlas y posteriormente crear de nuevo esas superficies.

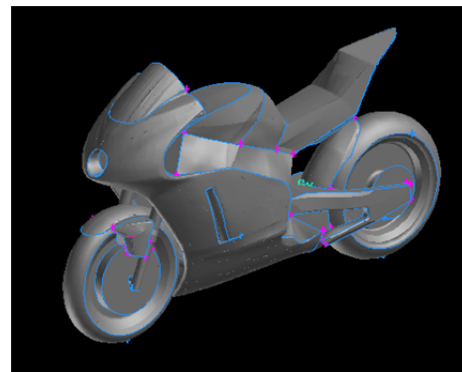
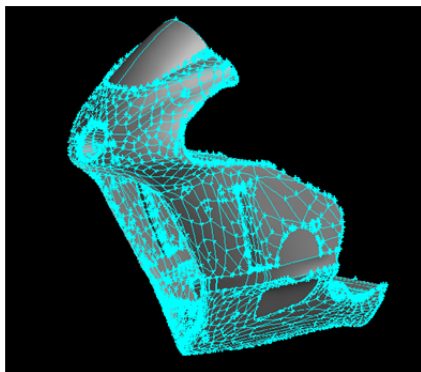


Figura 8.83: Paso del carenado de la BETA a la moto completamente montada y unida.

Problemas que han ido surgiendo a lo largo del desarrollo de los modelos geométricos

- Problemas referidos al consumo máximo de memoria RAM.
- Fallo en la representación sombreada de algunas superficies
- Deformaciones en la creación de algunas superficies.
- Problemas relacionados con la unión de piezas geométricas mediante simetrías.
- Grandes deformaciones del mallado por existir zonas geoméricamente complejas.
- Deformación de las geometrías al aplicar un mallado en zonas con curvaturas de radio muy pequeñas.
- Creación de geometrías volumétricas reales a partir de superficies virtuales.
- Realización de un mallado volumétrico con geometrías virtuales.

Soluciones aplicadas a los problemas surgidos

Las diferentes soluciones aplicadas para resolver los problemas que se han planteado se van a explicar en el mismo orden.

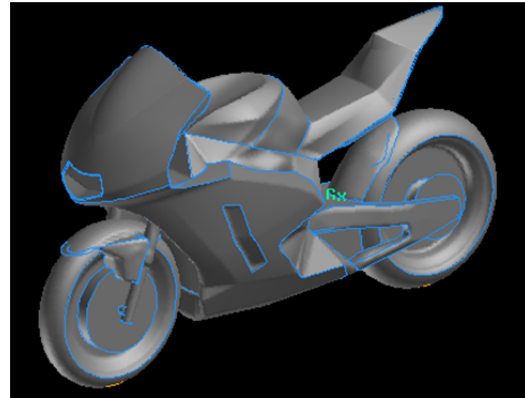
- La solución aplicada para solventar los problemas de consumo excesivo de memoria han sido el aumento de la capacidad de la memoria RAM de los ordenadores junto con realización de un “swap” en los discos duros, y así utilizar una parte de la capacidad de estos para simular memoria temporal RAM.
- Para corregir este error sólo basta con borrar dicha superficie problemática y volver a crearla, ya sea creándola de forma virtual o formando pequeñas superficies reales.
- Basta con aplicar la solución explicada en el punto anterior.
- La solución a este problema consiste en eliminar algunas superficies intermedias más para que al realizar la simetría, se puedan unir dichas caras de forma manual, volviendo a crear las superficies intermedias.
- Este problema surge debido a que la geometría de las motocicletas en algunas zonas es bastante compleja. Se corrige variando ligeramente dicha geometría hasta el punto de que el mallado sea válido realizando diversas pruebas en dicha zona.
- Dicho problema se soluciona aplicando la solución anterior.
- Los dos últimos problemas surgieron debido a la limpieza de las geometrías, es decir, al aplicar el “merge” las piezas pasan de ser reales a ser virtuales. Si se quiere crear un modelo tridimensional volumétrico, el Gambit sólo es capaz de trabajar con piezas reales.

Una primera solución que se adoptó fue la de transformar las piezas virtuales a reales, pero al realizar dicha operación estas se deformaban y posteriormente el Gambit no era capaz de procesar dichos piezas.

Una vez descartada esta solución, se optó por otra solución la cual consistía en utilizar un tercer programa llamado TGRID, el cuál es capaz de trabajar con mallados superficiales para luego crear mallados volumétricos, que son los que el Fluent es capaz de trabajar.

Tras corregir diversos fallos de la geometría este es el resultado final de la Ariane2 2013, puesto que en la figuras 8.82 y 8.83 ya se han mostrado los resultados finales de los otros dos modelos:

Figura 8.84: Modelo final completo con el carenado de la Ariane2 2013.



8.3.3 Túnel de viento virtual

Para hacer la simulación con un CFD se necesita crear un conducto por donde circule el aire e introducir dentro el modelo que queramos analizar. En estos casos se dibuja una caja que simula a un túnel de viento donde una cara representa la entrada y otra la salida de aire. Un tamaño recomendado para un túnel es que de largo sea al menos unas 10 veces la longitud del vehículo y que la sección de la motocicleta corresponda a un 8% de la sección de dicho túnel.

Las medidas aplicadas al túnel de viento son:

- En la parte anterior a la moto: 7m
- En la partes posterior de la moto: 20m
- La altura es de 8m
- El ancho es de 8m

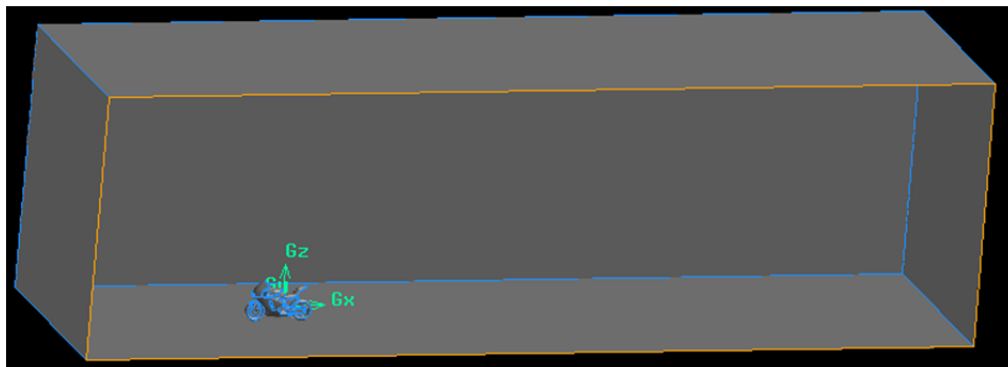


Figura 8.85: Una de las motocicletas dentro del túnel para hacer la simulación.

Es muy importante tener en cuenta el contacto del neumático con el suelo y la pequeña deformación que sufre. Lo que se hace es colocarlos de tal manera que se genere una pequeña intersección entre la rueda y el suelo. Se quita el sobrante y queda lo que sería la huella del neumático.

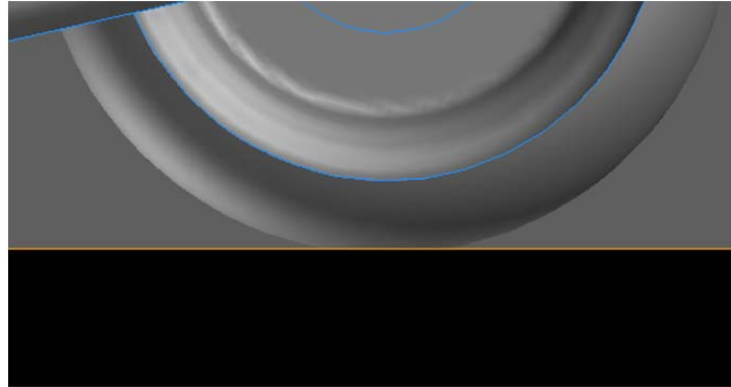


Figura 8.86: *Contacto del neumático con el suelo del túnel.*

8.3.4 Mallado

A la hora de aplicar un mallado a las diferentes superficies, se puede crear de diferentes maneras, es decir, se puede variar el tamaño de los elementos de la malla para tener más o menos precisión, y también se puede escoger la forma geométrica del mallado. Esta puede ser tetraédrica o trigonal. Utilizar cualquiera de las dos geometrías es igual de válida, sólo que si se utiliza la forma tetraédrica hay que tener un mayor control sobre la malla, ya que esta tiende a deformarse antes. Por otro lado también es importante saber que desde un inicio de mallado, la precisión que ofrece la forma trigonal es más elevada junto con menos problemas de deformación.

En lo que se refiere al mallado, para facilitar la elaboración de la malla, como ya hemos visto, previamente se han eliminado pequeños detalles geométricos que no influyen en el resultado final de la simulación, pero que sin embargo hubieran dificultado la elaboración de la malla. Evidentemente las propiedades de mallado son las mismas para ambos modelos.

Primero se hace un mallado de las superficies de los tres modelos. Dependiendo de las dimensiones de las diferentes superficies, el tamaño de los elementos de la malla varía entre 3 y 10 mm. El número de triángulos en estos modelos superan las 600.000 unidades.

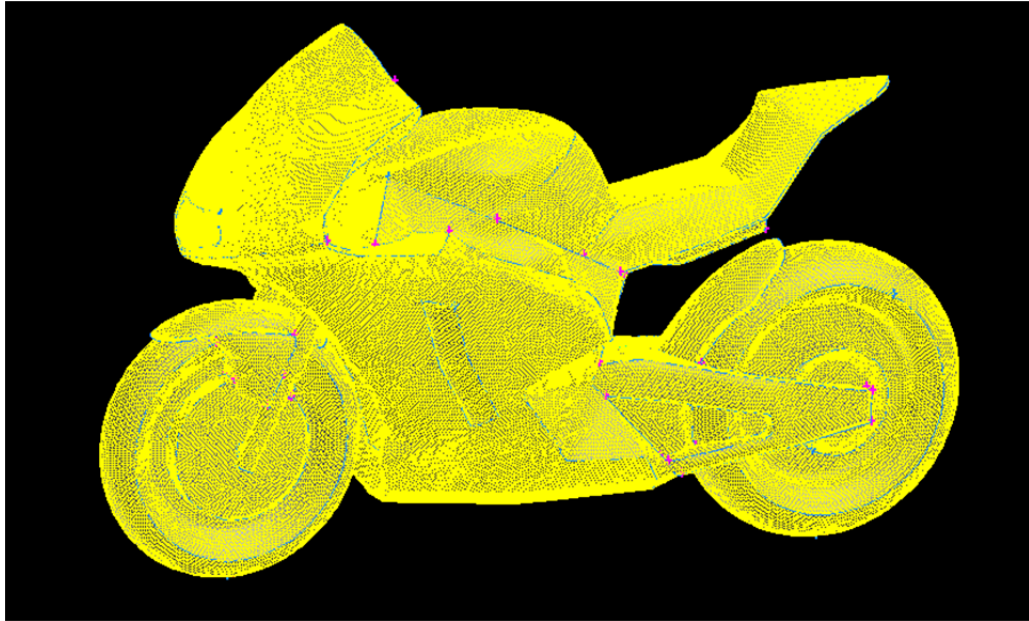


Figura 8.87: En esta imagen se pueden ver los triángulos del mallado de superficie.

Tras el mallado de superficie de las motocicletas, se procede a crear el mallado superficial de túnel. Los elementos de esta malla tienen un tamaño muy elevado comparado con el aplicado en las motocicletas, este es 400 mm.

8.3.5 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno definidas para su posterior simulación en Fluent son:

- Flujo de entrada del aire en el túnel: Velocity inlet
- Flujo de salida del aire en el túnel: Pressure outlet
- Paredes laterales: Symmetry
- Techo y suelo del túnel: Symmetry

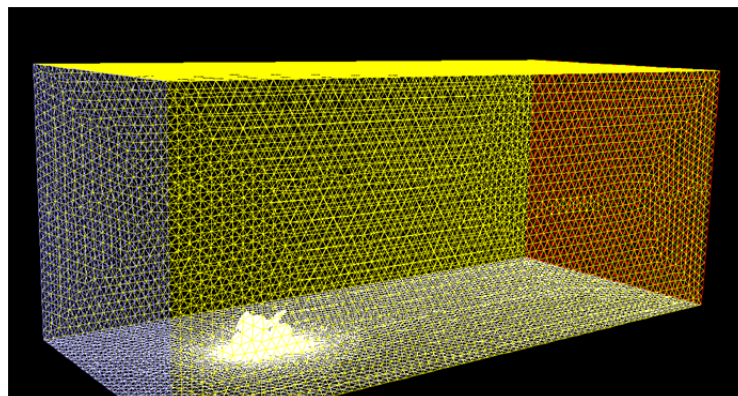


Figura 8.88: Condiciones de contorno.

8.4 Creación de la malla “ambiente” con el TGRID

Como ya se ha comentado con anterioridad, no fue posible poder crear un mallado volumétrico en el Gambit mediante figuras volumétricas reales. La solución hallada a este problema fue utilizar un tercer programa llamado TGrid.

Este programa, a diferencia del Fluent es capaz de tratar mallados superficiales en tres dimensiones, a la vez de que también es capaz de procesar estas para después crear una malla volumétrica o ambiente entre las mallas superficiales.

Otra gran cualidad que posee este programa que lo hace realmente ser una herramienta muy potente es la de crear transiciones muy exactas entre una malla que tenga una gran precisión y otra que no lo sea, como lo que ocurre en este proyecto. De esta manera ya no hace falta preocuparse de crear líneas de transición para generar dicha transición.

Otra gran característica de este software, es la posibilidad de eliminar mallados volumétricos de manera sencilla para luego poder exportarlos al Fluent, ya que este último sólo es capaz de procesar una única malla volumétrica. Esta característica fue utilizada con el fin de comprobar que no existían zonas abiertas en las piezas procesadas en Gambit.

8.5 CFD con el “FLUENT”

Como ya se ha mencionado en repetidas ocasiones, el análisis aerodinámico se realizó con técnicas computacionales denominadas CFD. Esta técnica nos proporciona todo tipo de datos aerodinámicos a partir de una simulación virtual. A continuación se muestran detalladamente todos los pasos realizados y los datos necesarios para lanzar el análisis. Los resultados se mostrarán en el apartado número 9.

Para las simulaciones se ha supuesto que el vehículo está circulando a 50 m/s (180 Km/h), por lo que se ha simulado una corriente incidente de aire sobre el vehículo a esta velocidad.

A esta velocidad el número de Reynolds es suficientemente alto como para que el flujo sea completamente turbulento, y C_D aproximadamente constante independientemente de la velocidad.

El análisis se ha lanzado como incompresible, ya que en estos casos el número de Mach es menor que uno, por lo que se pueden despreciar los efectos de compresibilidad del fluido.

Los modelos físicos establecidos que se van a tener en cuenta para el procesamiento de los cálculos son:

- Tridimensional
- Estacionario
- Fluido Gaseoso (Aire)

- Flujo segregado
- Densidad constante
- Continuo
- Turbulento: intensidad de 1% y una longitud de 0,1m
- Turbulencia: K-Epsilon de 2 ecuaciones
- RANS (promedio de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes)
- Gravedad

La densidad del aire por defecto es de 1.225 kg/m^3 .

Para asegurar de que los modelos preparados eran aptos para la simulación, se realizaron unas 400 iteraciones con la intención de averiguar si las gráficas de los residuos convergían. De no ser así hay que volver al Gambit para realizar un chequeo del mallado, ya que este en alguna zona tendrá elementos muy deformados que provocan la existencia de turbulencias y desprendimientos falsos.

Una vez visto que las gráficas residuales convergen, se procedió a un refinado de las mallas. Este refinado sirve para obtener una mayor precisión en aquellas zonas con un mayor gradiente de presiones entre los límites de los elementos de los que está compuesta la malla.

Tras varias pruebas, se llegó a la conclusión de que los ordenadores disponibles para realizar estas simulaciones, sólo permitían un refinado de unas 80.000 celdas. Pasando a tener más de dos millones de elementos en el mallado, que inicialmente no llegaban a 1,8 millones.

Después e establecer este refinado, se procedió a realizar unas 4000 iteraciones en cada modelo, con fin de asegurar la convergencia y estabilidad en el tiempo de las soluciones aportadas por las gráficas de residuos.

9 Simulaciones

9.1 Graficas de residuos

Los tres casos estudiados se han calculado en modo estacionarios, pero a la hora de realizar los cálculos CFD, el Fluent se enfrenta en realidad al cálculo de una configuración no estacionaria (la estela de la moto), por lo que a la hora de obtener unos resultados, estos casi siempre oscilarán entorno a un resultado. Para estar seguro de esto último, se han realizado las iteraciones necesarias para tener la certeza de que hay una cierta convergencia de los residuos entre iteraciones, es decir, que hay una estabilidad.

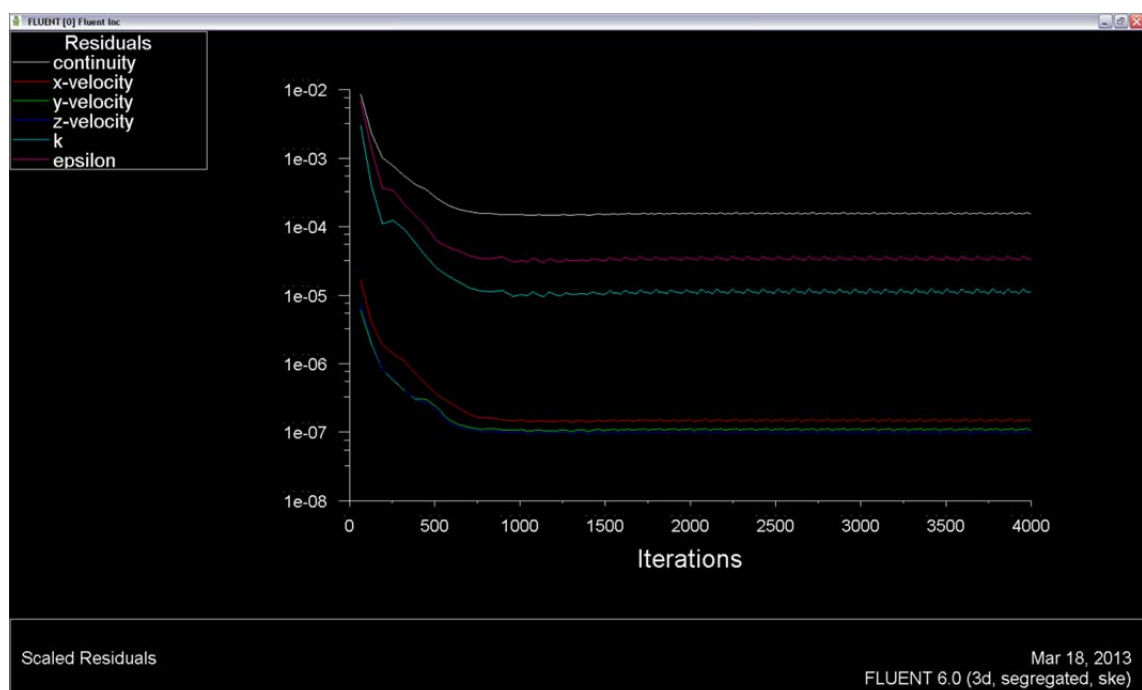


Figura 9.1: Gráfica de los residuos Ariane2012.

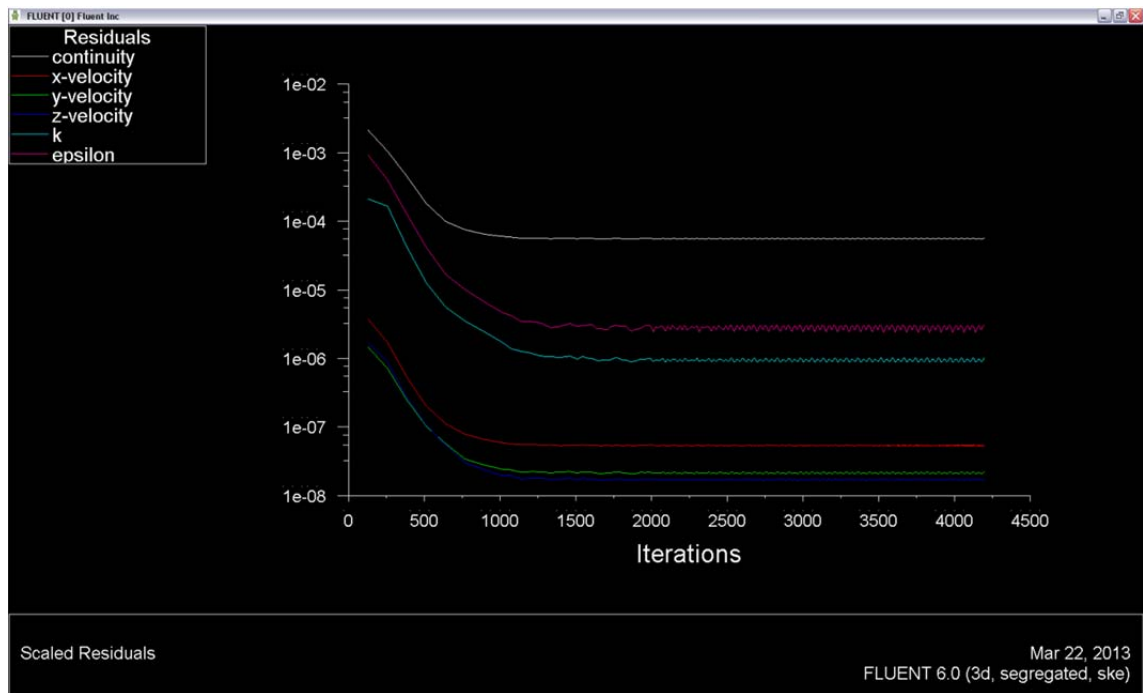


Figura 9.2: Gráfica de los residuos BETA.

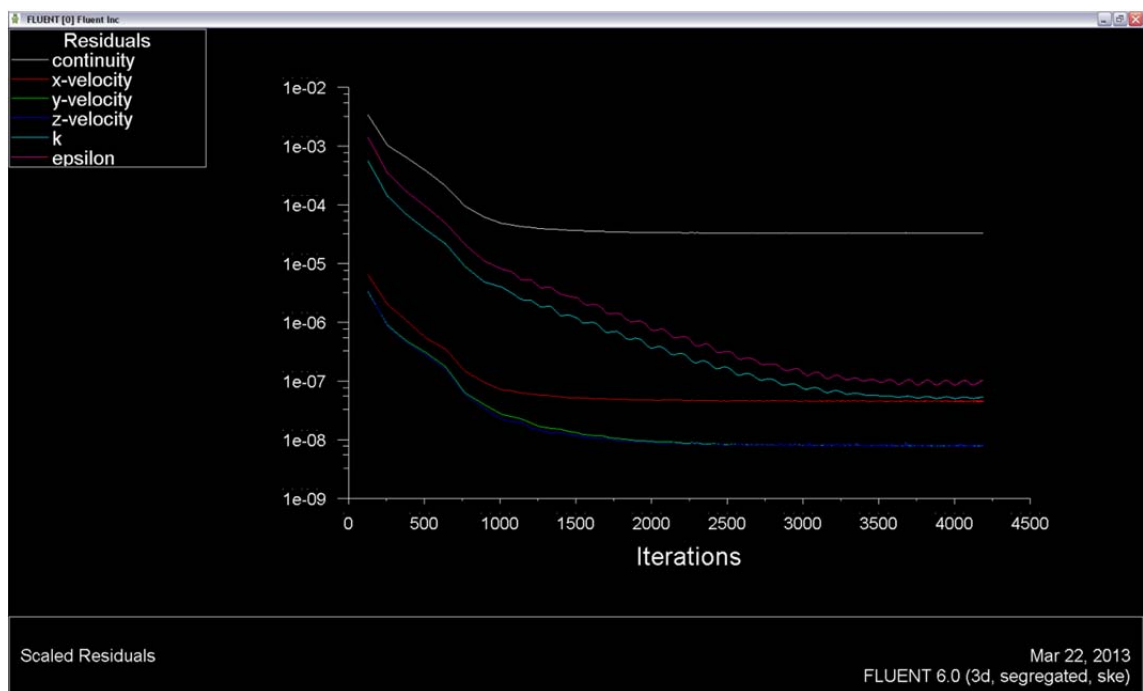


Figura 9.3: Gráfica de los residuos Ariane2013.

Cuanto más rápido vayan disminuyendo los residuos, mayor es la convergencia, y cuanto más bajos sean los valores de estos, más precisos serán los resultados obtenidos.

A la hora de obtener estos resultados, con los equipos de los que se han dispuesto, se han necesitado unas 48 horas de trabajo, ya que los equipos tardan alrededor de un 1 minuto por iteración. Esto último ha variado según el equipo informático utilizado y la moto estudiada.

Como se puede observar, dependiendo de las motos los residuos se van estabilizando de diferente forma. En el caso de la Ariane2012 se puede observar que aproximadamente a partir de 1000 iteraciones ya ha convergido. Más o menos ocurre lo mismo en el caso de la BETA, que a partir de las 1200 iteraciones ha convergido; pero no ocurre lo mismo con la Ariane2013, que hasta las 3700 iteraciones aproximadamente no ha convergido totalmente y luego se estabiliza como en las dos anteriores.

9.2 Simulaciones (Mapas Gráficos)

En este apartado se va realizar una comparación de los tres modelos en función de los resultados obtenidos. Para obtener dichos resultados se ha considerado una velocidad de 50 m/s, es decir, de unos 180 km/h.

Los software CFD son capaces de crear mapas gráficos en los cuales son capaces de representar una gran cantidad de datos de forma que luego se puedan interpretar de manera sencilla. Los datos que manejan se representan en unos gráficos de fácil visualización, a la vez de que puedan ser interpretados de manera visual.

Poseen una escala de colores, en los cuales los valores más elevados son tonos anaranjados y rojizos y los valores más bajos se representan con colores verdes y azules.

A continuación se muestran los distintos mapas de presiones y velocidad para establecer de forma visual las diferencias que se pueden encontrar entre las tres motos.

9.2.1 Mapas de presión

Mapas de presión estática:

Ariane 2012

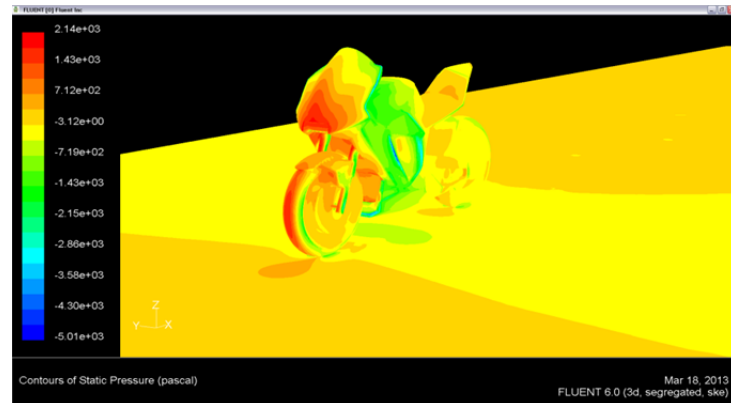


Figura 9.4.

BETA

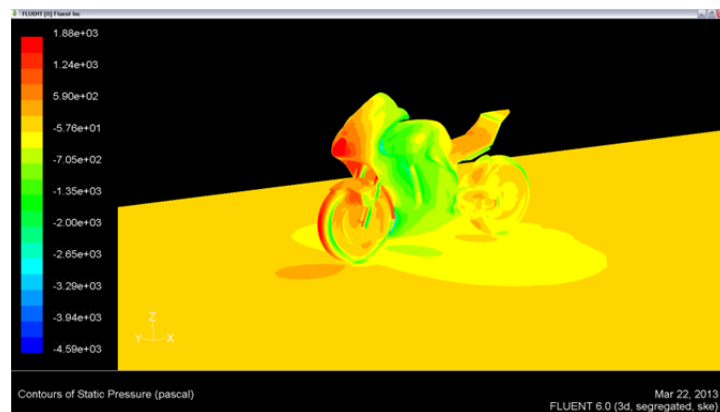


Figura 9.5.

Ariane 2013

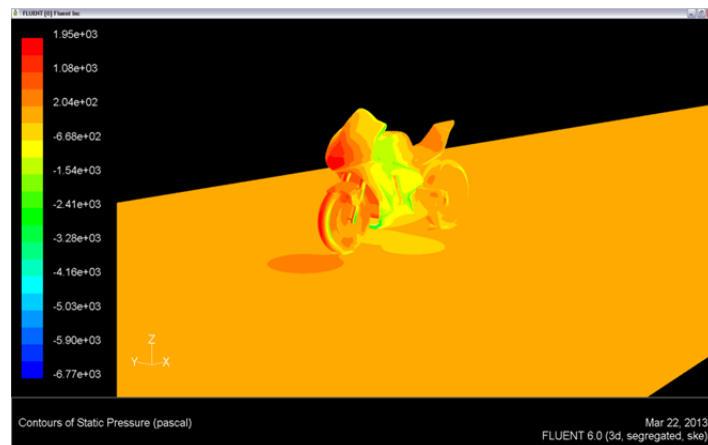


Figura 9.6.

Mapas de presión longitudinal y transversal:

Ariane 2012

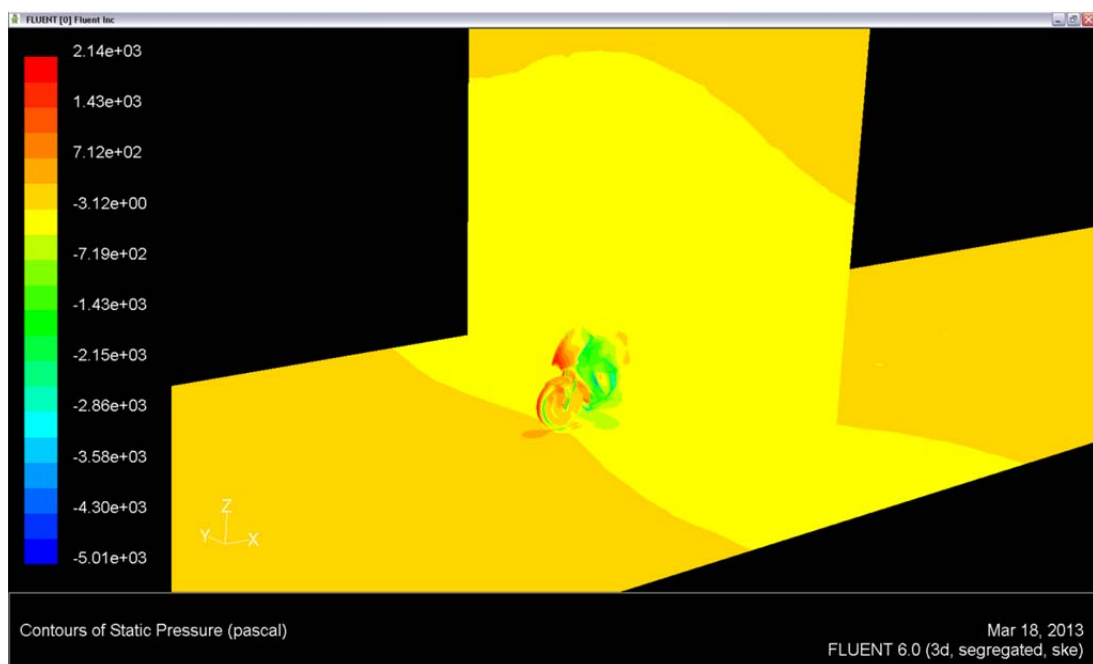
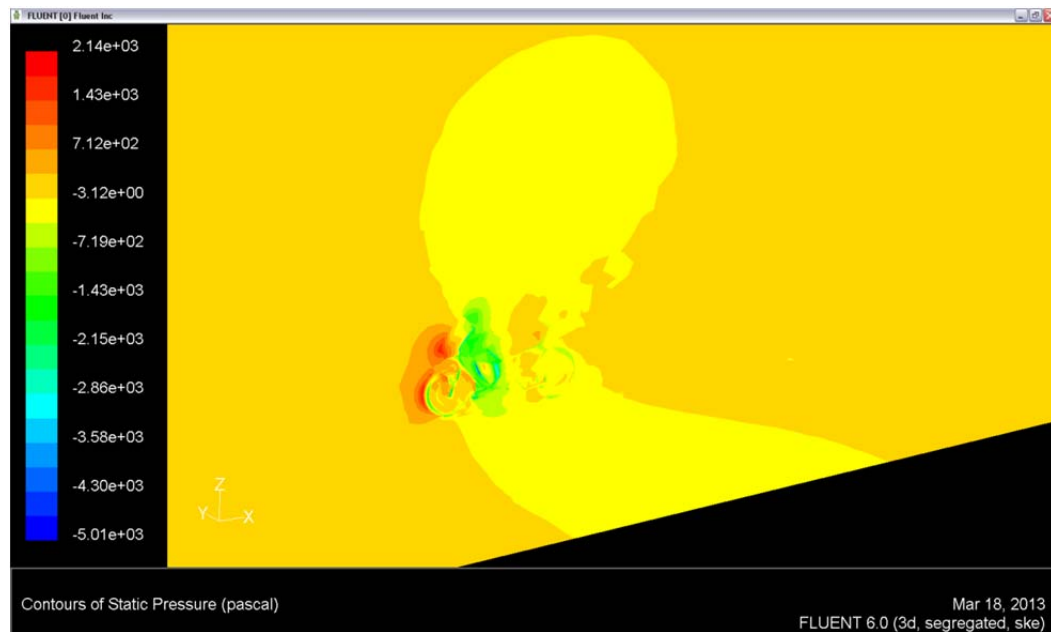


Figura 9.7.

BETA

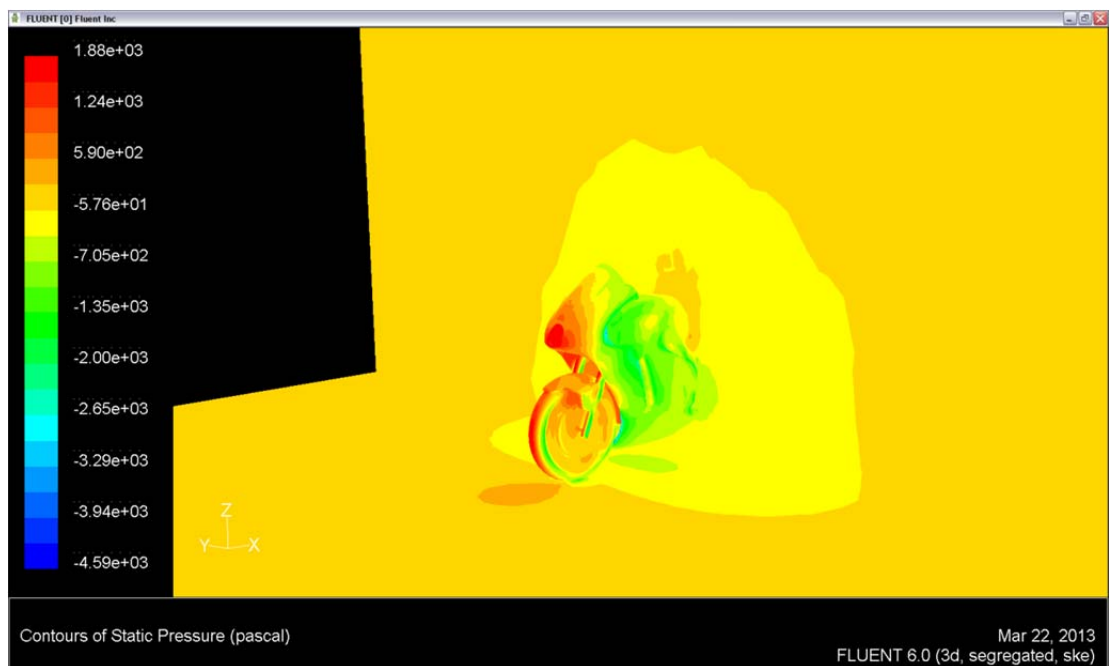


Figura 9.8.

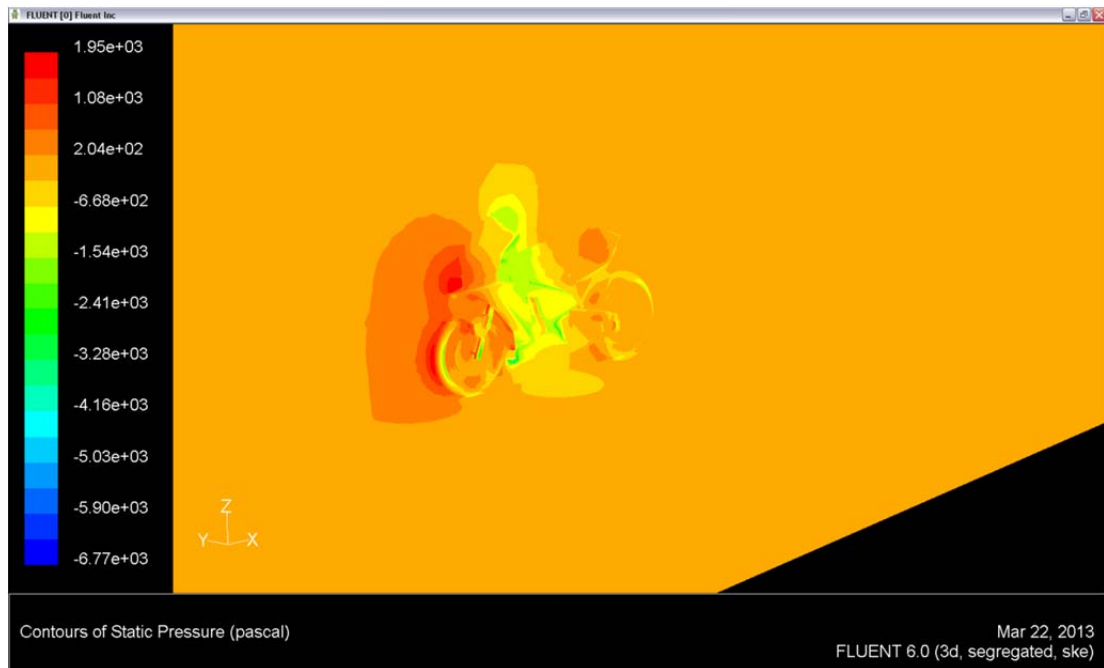


Figura 9.9.

Como se puede ver, la presión en la parte delantera de la rueda delantera es mayor que en resto de la moto ya que es el primer elemento que incide con el aire directamente y también es el primero que atraviesa este. Descartando las ruedas el siguiente elemento en el que los valores de presión también son muy altos, es la parte delantera de la carena de la moto, donde

se encuentra la toma de aire. Esto se debe a la deceleración que sufre el aire cuando se introduce dentro de la toma, llegando a haber puntos de remanso en esta zona.

Como curiosidad decir que la parte delantera de la carena de las motocicletas de competición, es la mejor zona donde colocar el "airbox". El airbox es una caja que envuelve el carburador que se emplea para que el aire que se emplea en la mezcla con la gasolina entre con mayor presión y así conseguir mayores potencias en estos procesos.

En la parte central de las motos, en la Ariane 2012 y la BETA hay una mayor aceleración del aire ya que como se puede ver en los mapas gráficos, los valores de la distribución de presiones son menores que en caso de la Ariane 2013.

En la parte trasera de las motos, la situación es más o menos parecida, ya que la distribución de presiones es muy similar en la Ariane 2012 y en la BETA, habiendo más aceleración del aire incluso en esta última, esto último se puede demostrar viendo la distribución de presiones en función de los tonos de los colores en esta zona. En lo que respecta a la Ariane 2013, los valores de presión en la parte trasera son mayores, como se puede observar según la distribución de colores.

Otro factor muy importante a tener en cuenta es la depresión de presiones que se generan debido a la estela que queda tras las motos, ya que esto toma mucha importancia en lo referente a la resistencia al avance.

Cuanto mayor sea la estela que deja, mayor es la resistencia al avance que se genera debido a que la depresión de presiones generadas es mayor y por tanto hay mayor succión en la parte trasera dificultando así el avance. Por lo que al haber una mayor distribución de presiones en la parte delantera y menor sea esta en la parte trasera, mayor será esta depresión y por consiguiente mayor será esta succión en el sentido opuesto al avance.

El caso en el que ocurre es el que una moto se sitúa detrás de otra, es decir, en el caso de rebufo, la depresión generada por la estela tras la moto es menor debido a la moto que se encuentra situada justo detrás, por lo que la velocidad que puede alcanzar la moto es mayor que yendo sola.

9.2.2 Mapas de velocidades

Los valores de las velocidades se miden respecto a la velocidad de la propia moto, ya que esta se encuentra en una simulación de túnel de viento y no en la carretera. Por tanto como se verá a continuación, las velocidades de las motos se consideran nulas.

Ariane 2012

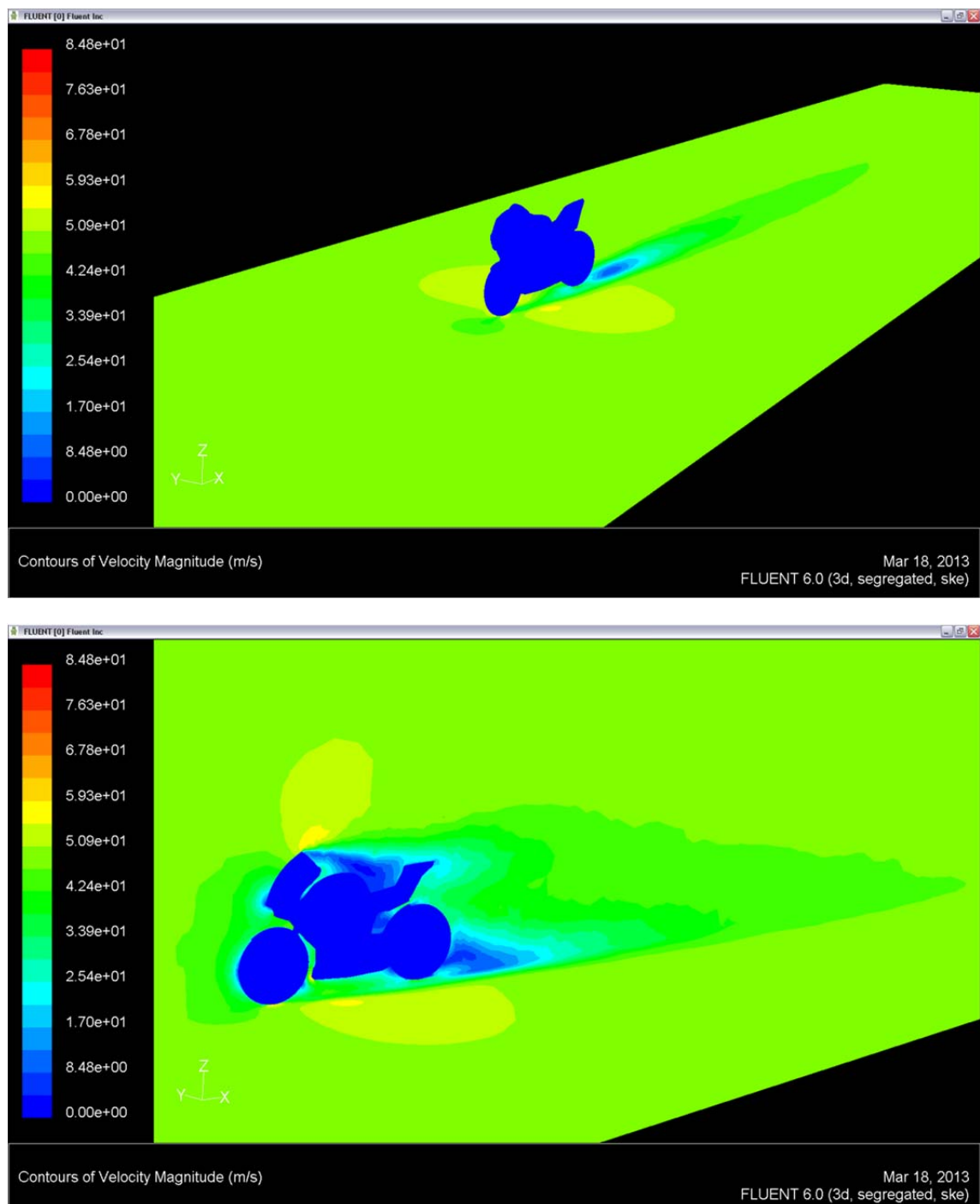


Figura 9.10.

BETA

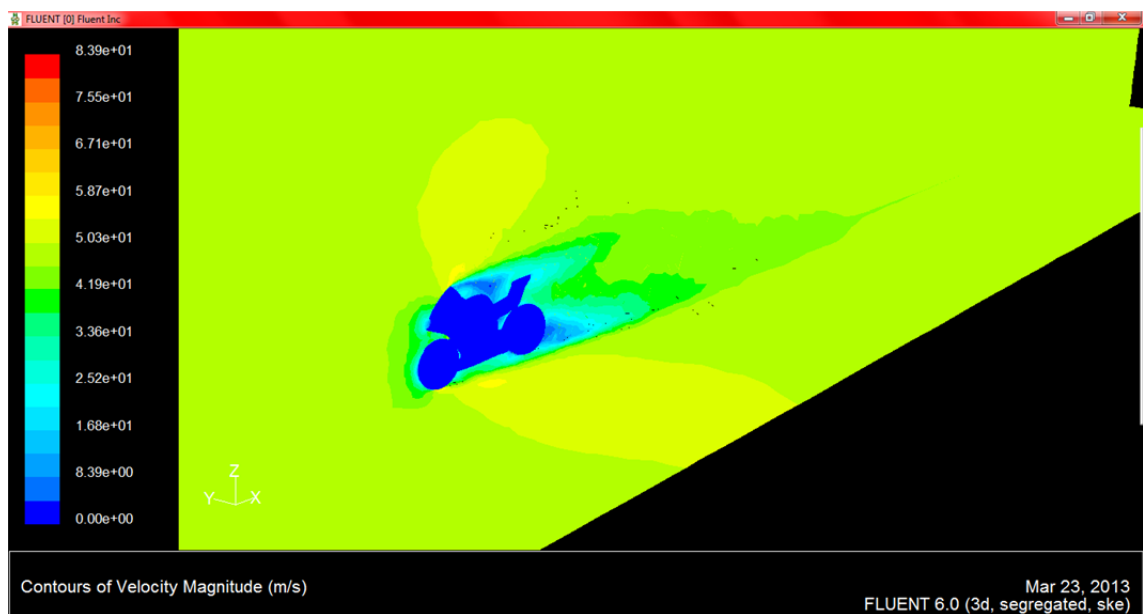
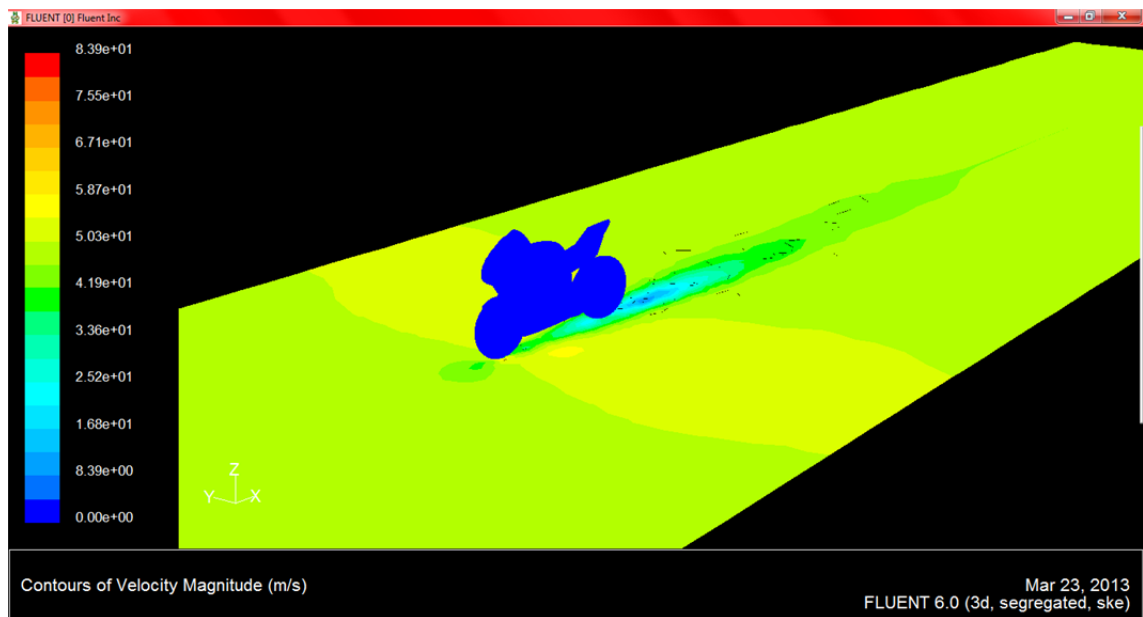


Figura 9.11.

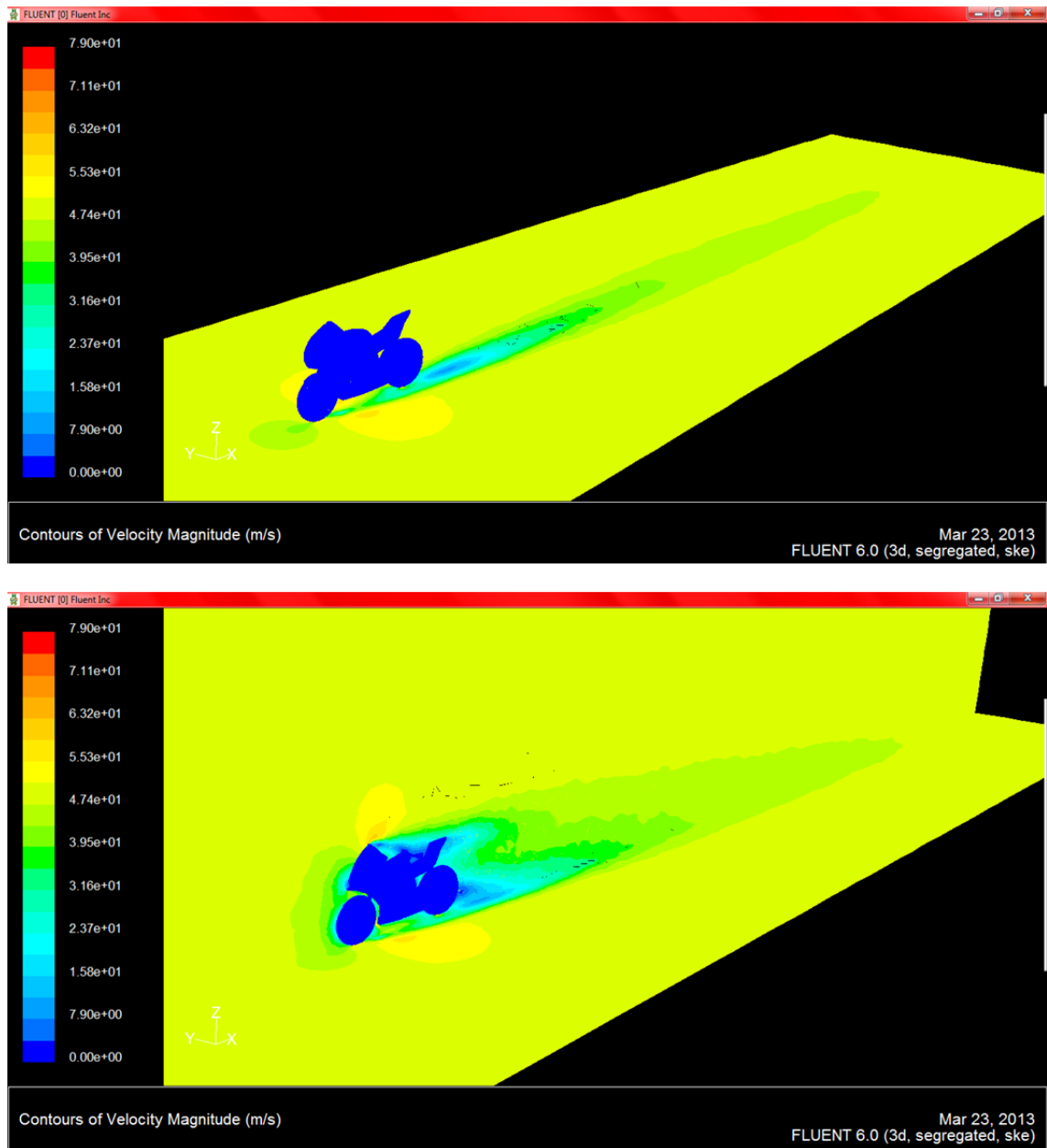


Figura 9.12.

En cuanto a las estelas que dejan tras de sí la motos, si las comparamos con las de gradiente de presiones, son muy parecidas en cuanto a forma. Esto se debe a que están directamente relacionados, pero en estos mapas se puede ver de forma más clara o que está ocurriendo.

Por otro cabe decir que en cuanto a la forma de las estelas, son muy parecidas unas con otras. Se puede observar que todas las motos dejan tras de sí dos ramas de depresión, pero hay diferencias en lo referente a su longitud. Se puede observar que la estela con más longitud es la que deja la Ariane 2013, y en orden decreciente la BETA y por último la Ariane 2012.

En lo referente a la zona de la cúpula, aunque las tres motos tienen la misma, se puede observar que la variación de los mapas de velocidades es diferente. Esto es debido por las diferencias geométricas entre las distintas carenas y de los diferentes comportamientos que tiene el aire al incidir contra estas.

En la Ariane 2012 se puede observar, que cuando el aire se desprende de la cúpula, este se acelera. Esta aceleración es mayor justo después del desprendimiento y luego disminuye a medida que el aire va avanzando.

En la BETA se da este mismo fenómeno, y comparando los mapas de velocidades se puede observar que la forma en la que varía la velocidad del aire es muy similar, a diferencia de que en la BETA esta zona de aceleración del aire es claramente más grande.

Por último, en la Ariane 2013, al igual que en las otras dos motos, también hay una aceleración del fluido en esta zona. A diferencia de las anteriores es, por un lado que la zona en la que ocurre esta aceleración por el desprendimiento es menor y que la aceleración del fluido es mayor. Por lo que se llega a la conclusión de que el aire a la hora de incidir contra esta carena y después su movimiento sobre esta es menos brusco en cuanto al cambio de dirección que sufre la corriente, es decir, que se ejerce menos resistencia al aire.

En cuanto al aire que se encuentra en la zona del depósito y asiento, aunque no se encuentre el piloto situado, se puede observar que de las tres motos la que más decelera el fluido en esa es la Ariane 2012. Por lo que si consideráramos una en la que tuviéramos el piloto, se tendría que ver si la visera del caso del piloto cumple su función, es decir, evitar que el flujo del aire pase por el cuello del piloto y quede adherido a la espalda de este, lo que podría producir recirculaciones o turbulencias del aire, que molestarían al piloto.

Considerando el caso en el que se tuviera un piloto y el flujo de aire quedara adherido a la espalda de este, si el flujo de aire es bien canalizado puede servir de gran ayuda ya que en el cómputo general se podría obtener un mejor perfil aerodinámico.

Ariane 2012

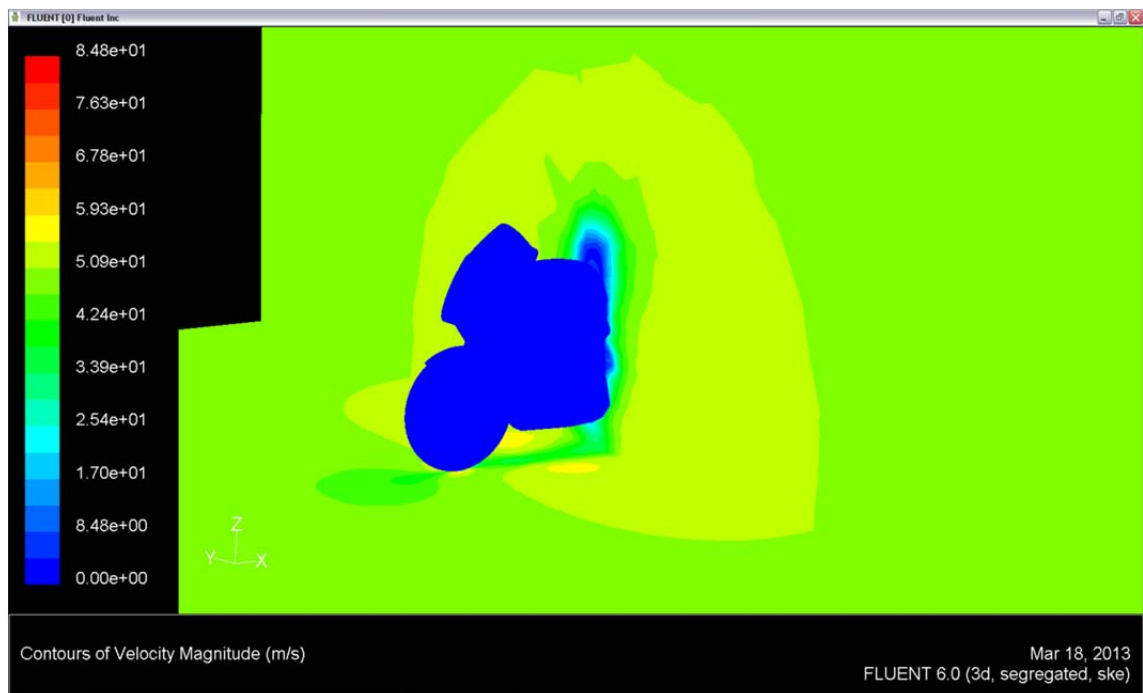


Figura 9.13.

BETA

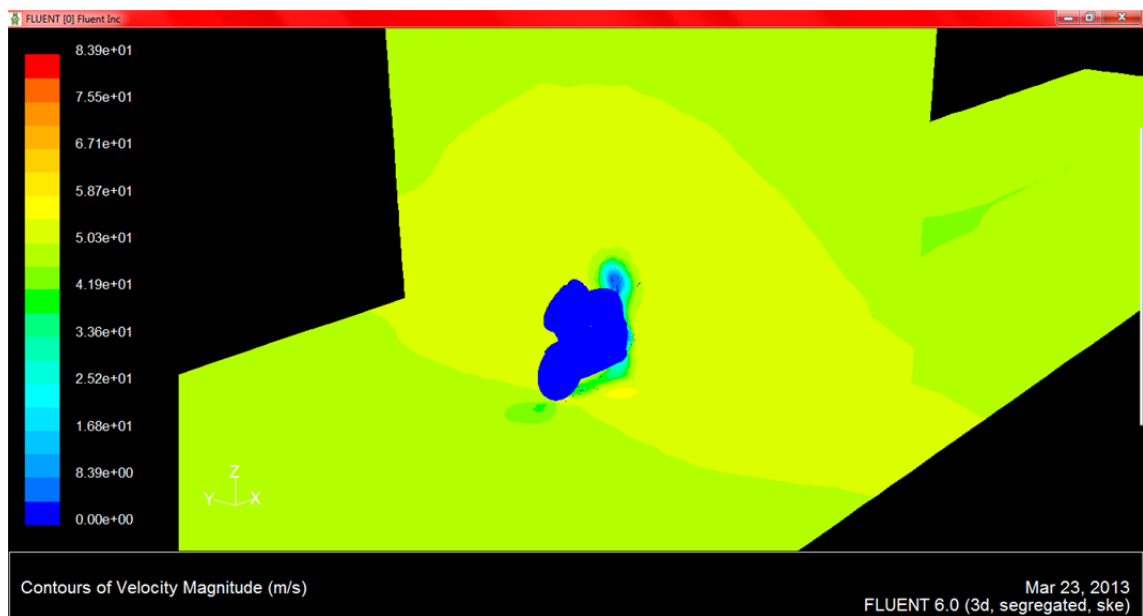


Figura 9.14.

Ariane 2013

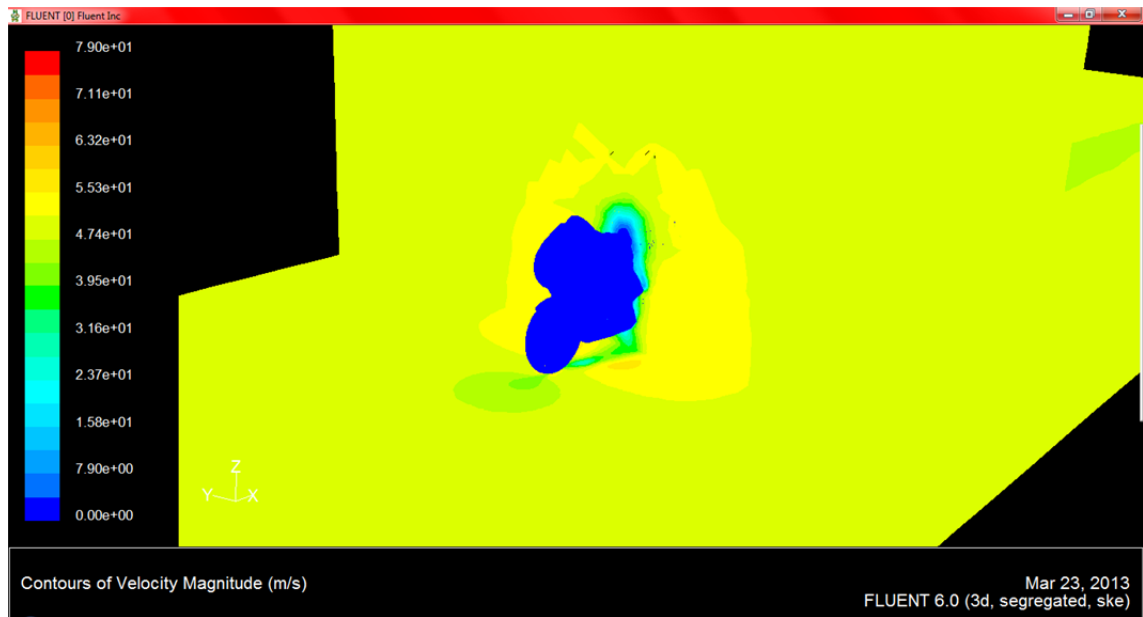


Figura 9.15.

Aquí podemos observar la variación de la velocidad del aire transversalmente. En la zona más próxima al depósito se observa que el aire está parado, pero a medida que nos vamos alejando el aire va teniendo una velocidad mayor.

En el caso de la Ariane 2012 la aceleración del aire es próxima a esta, pero esta aceleración no es muy grande, como podemos observar en la escala de valores del gradiente de velocidades.

En el caso de la BETA la cosa varía significativamente en comparación con la moto anterior. Como se puede observar en la imagen, la variación de la velocidad de velocidad alrededor de la moto es mucho mayor y en cuanto a la aceleración del fluido, aunque la variación es en la misma proporción que la moto anterior, si observamos la escala de valores y colores mostradas en la imagen, vemos que la velocidad del fluido es mayor en general.

Por último, en la Ariane 2013, lo que sucede es muy similar a la Ariane 2012, es decir, la aceleración del fluido se produce en una zona muy próxima a la moto y no como en la BETA, que es mucho más ancho, sino que además la aceleración que adquiere el fluido en esta zona es mayor que en los dos casos anteriores ya que de por sí la velocidad que no sufre aceleración por estar más alejado de la moto, posee una velocidad mayor.

Por lo que con las mismas condiciones para las tres motos, se puede observar que el perfil aerodinámico de la Ariane 2013 es mejor que el de las otras dos.

9.2.3 Vectores de velocidades

Los vectores son muy útiles a la hora de mostrar la dirección y la magnitud de la velocidad/presión en cada punto y así poder detectar turbulencias.

Ariane 2012

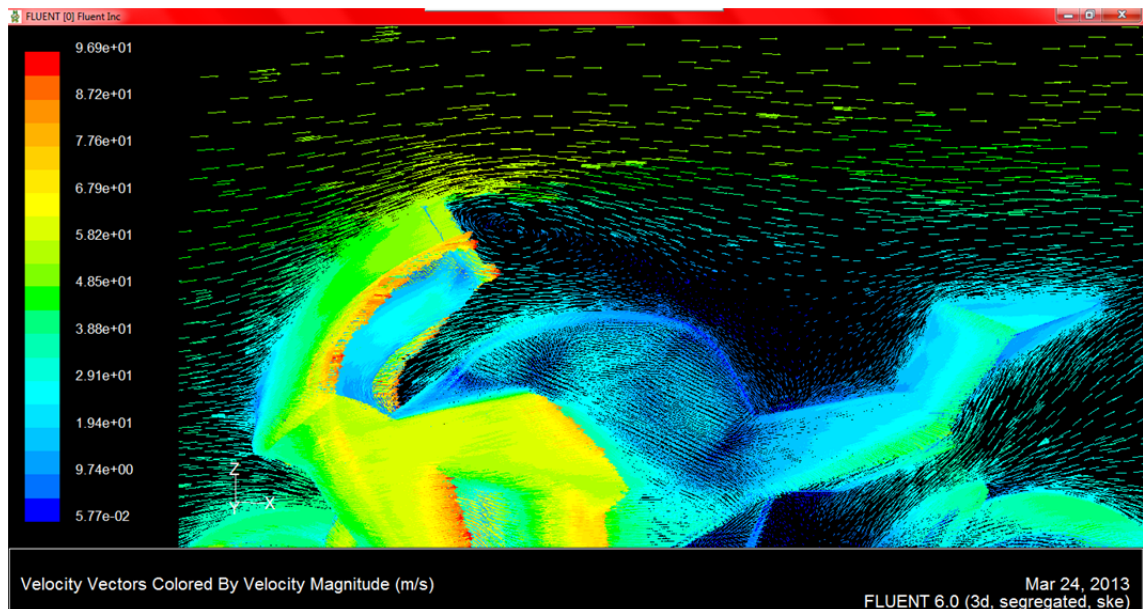
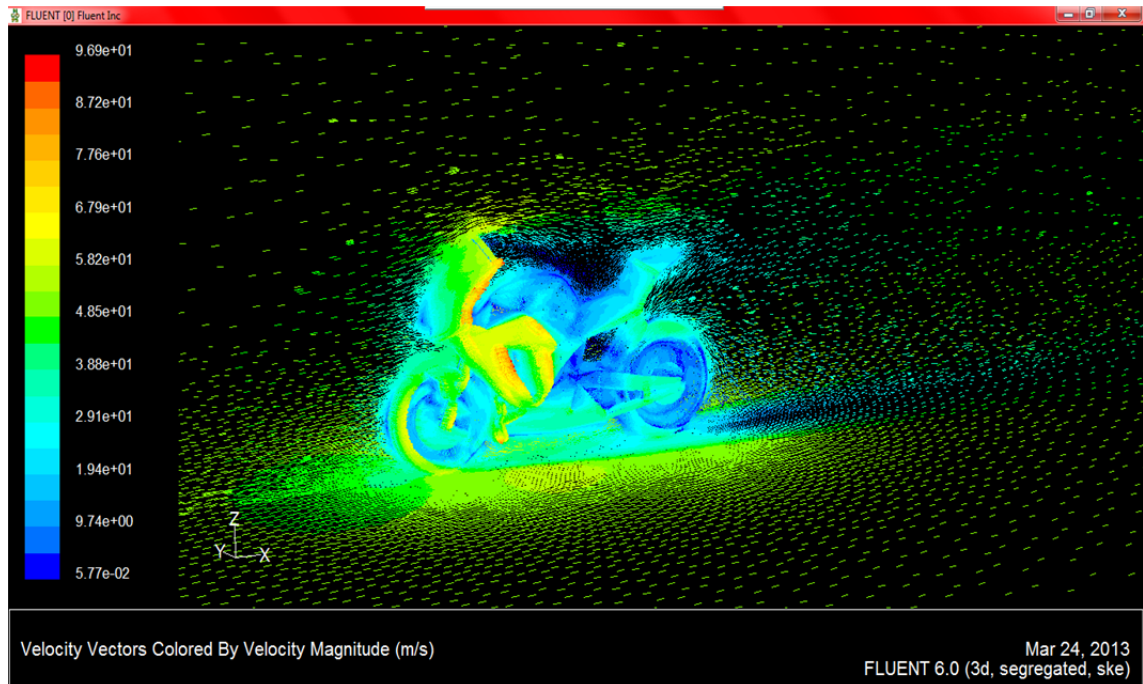


Figura 9.16.

BETA

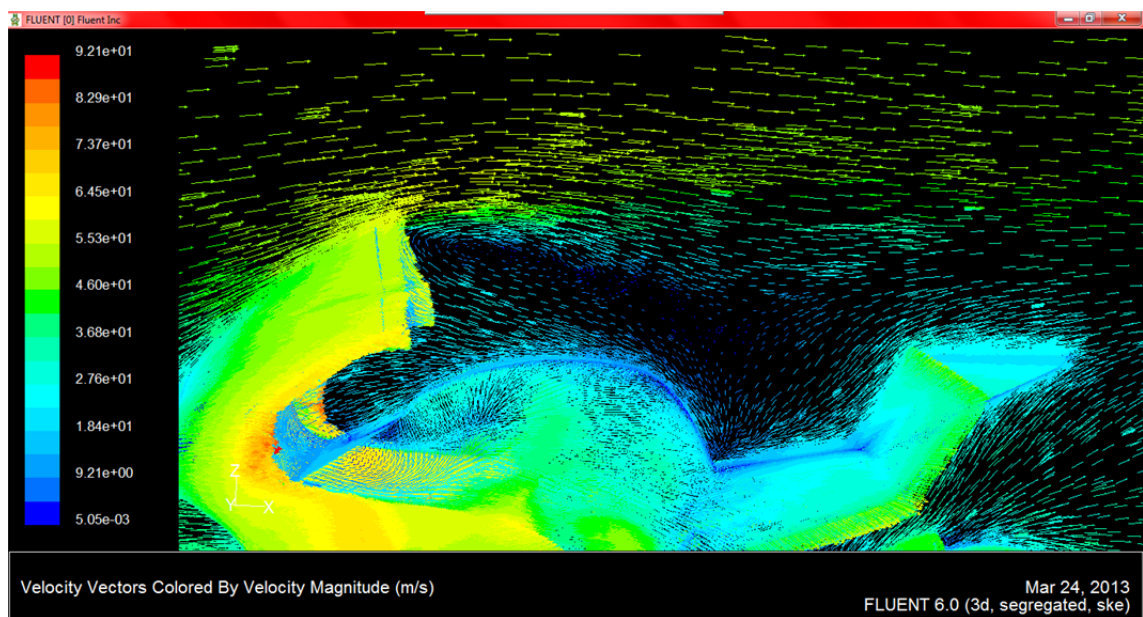
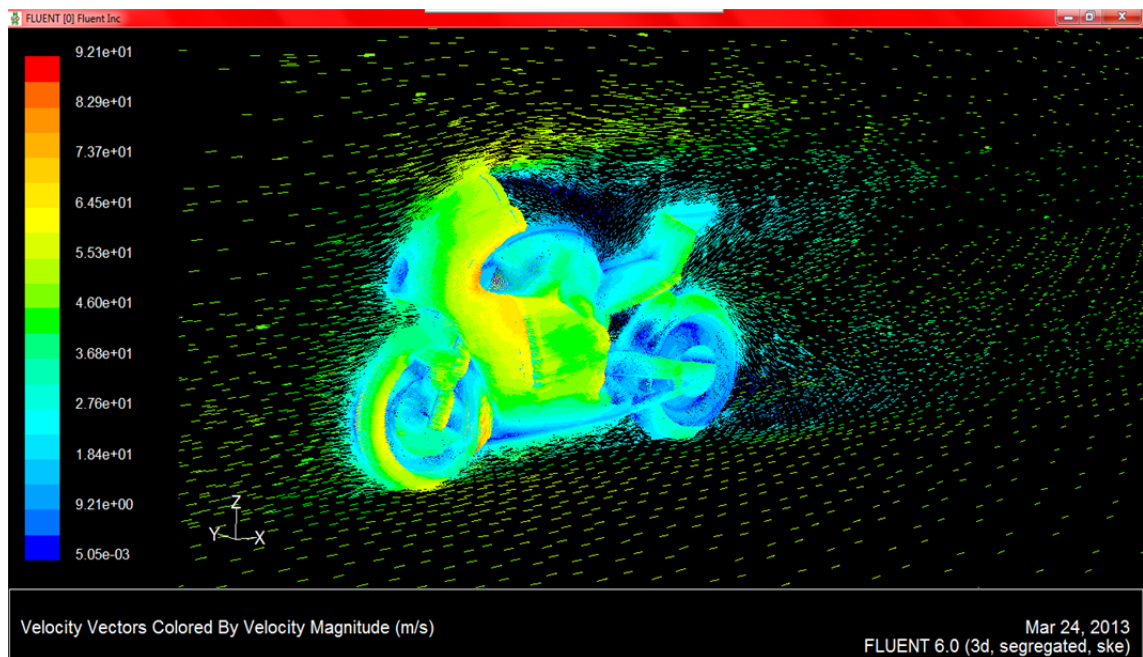


Figura 9.17.

Ariane 2013

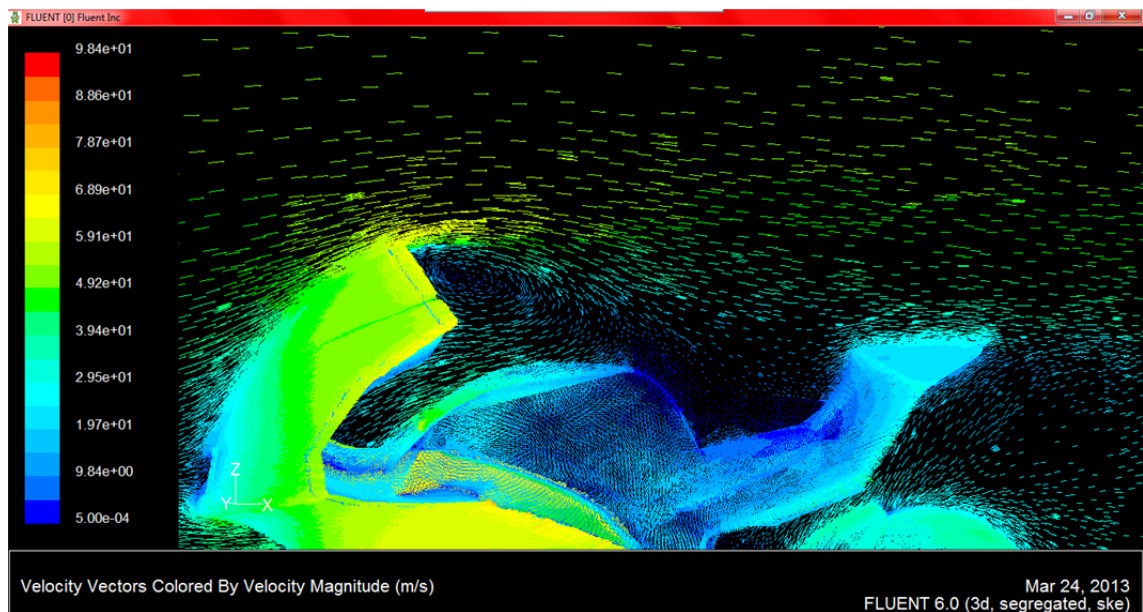
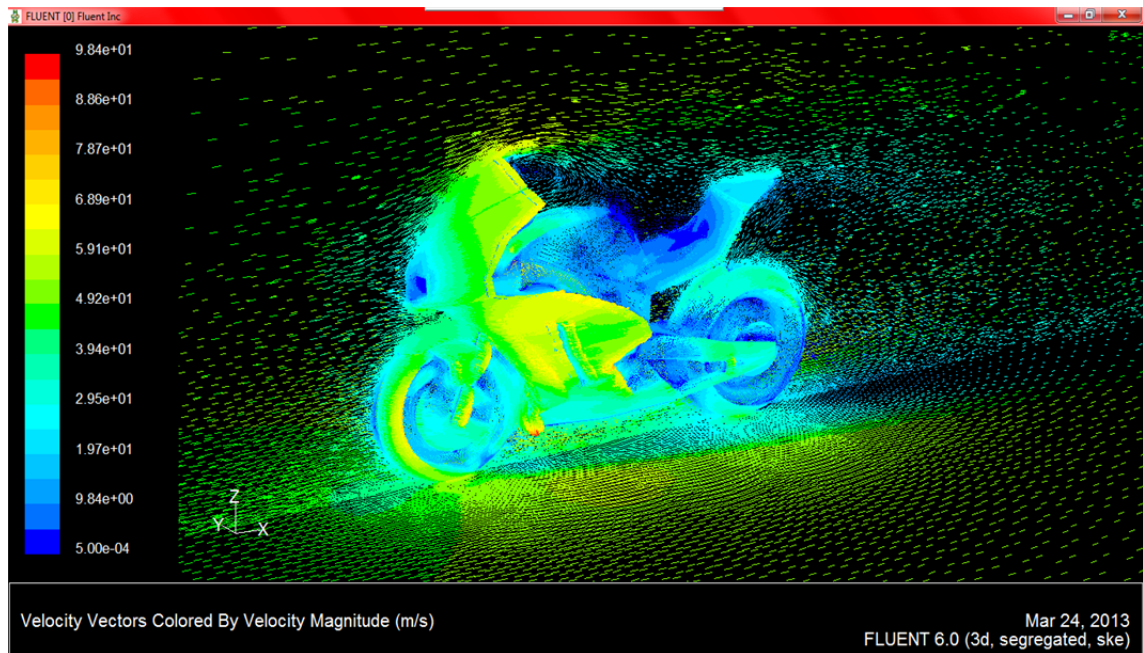


Figura 9.18.

Como se puede apreciar tanto en el modelo de la Ariane 2012 como en el de 2013, se puede observar que al término de la cúpula se produce una pequeña turbulencia en esa zona, siendo un poco más concentrada esta en el modelo de Ariane 2012. En el caso de la BETA también se produce una turbulencia en esta misma zona pero no es tan concentrada, teniendo una forma más oblicua y más alargada.

Ariane 2012

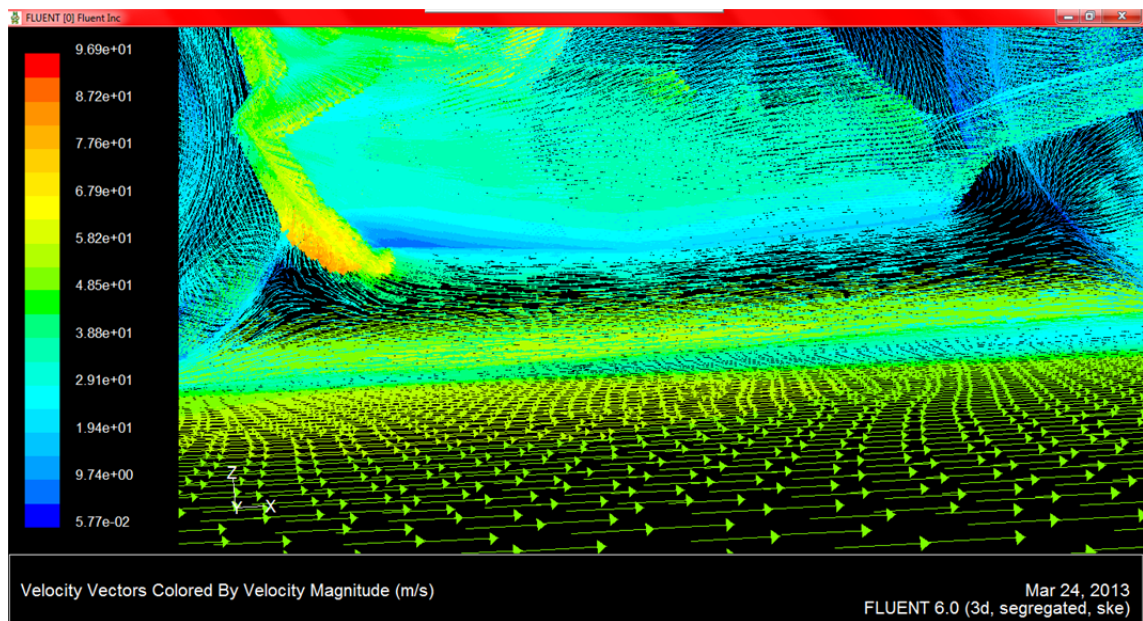


Figura 9.19.

BETA

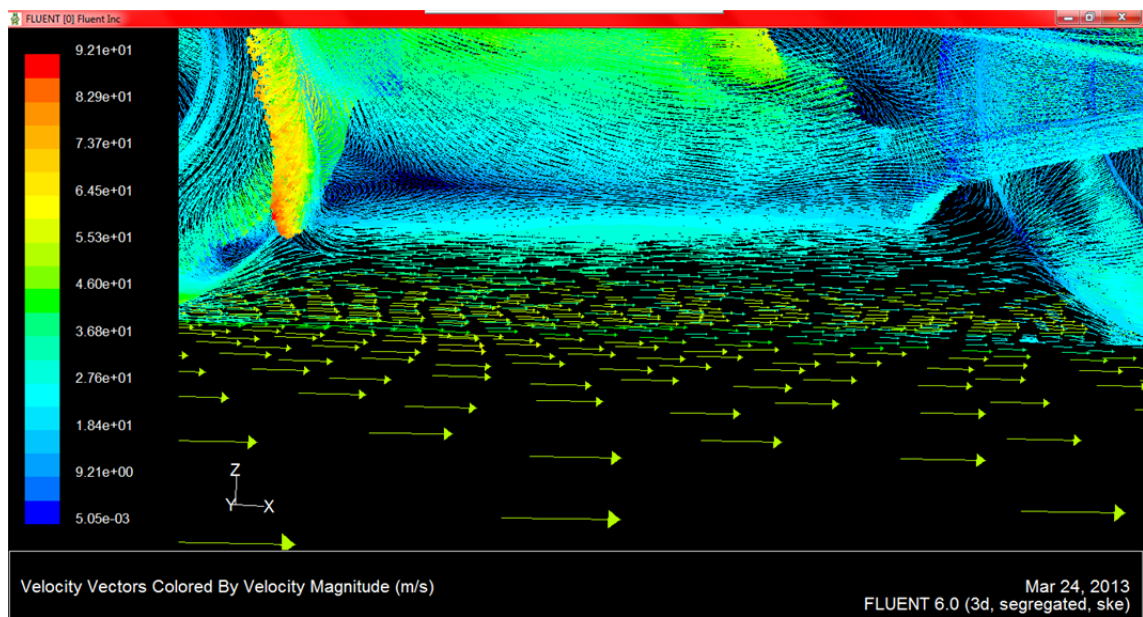


Figura 9.20.

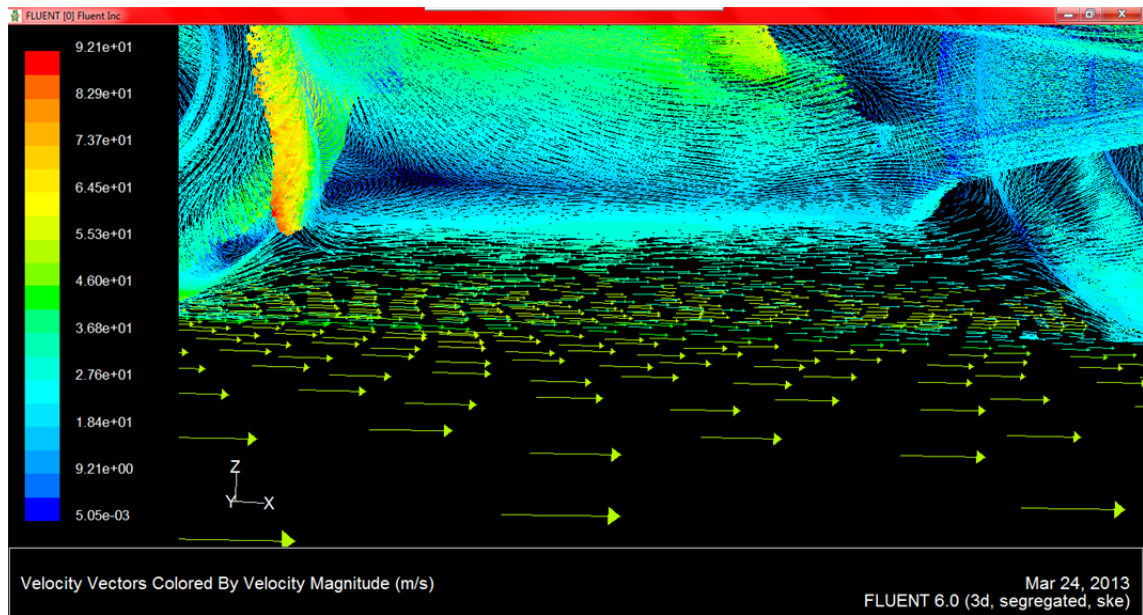


Figura 9.21.

En la parte inferior de las motos o quilla, se puede ver con claridad que todas son rectas, por lo que en esta se crea una turbulencia como se puede observar en las imágenes. Una solución para este problema puede ser por ejemplo dar una pequeña curvatura y colocar un spoiler o muesca al final de la quilla para re-direccionar el flujo y evitar la creación de esta turbulencia. A parte de las soluciones aportadas, otra posible solución es alargar más la quilla hasta llegar a la rueda trasera y dar una forma parecida a la de un guarda-barros con la curvatura antes ya mencionada.

Ejemplo:

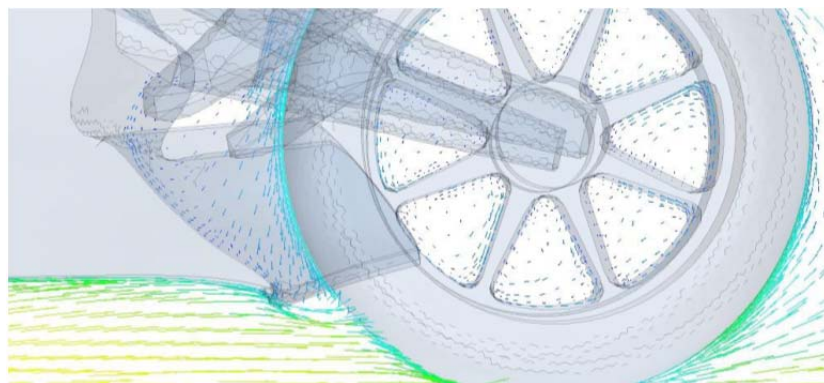


Figura 9.22: Solución aportada por Aprillia Racing.

Ariane 2012

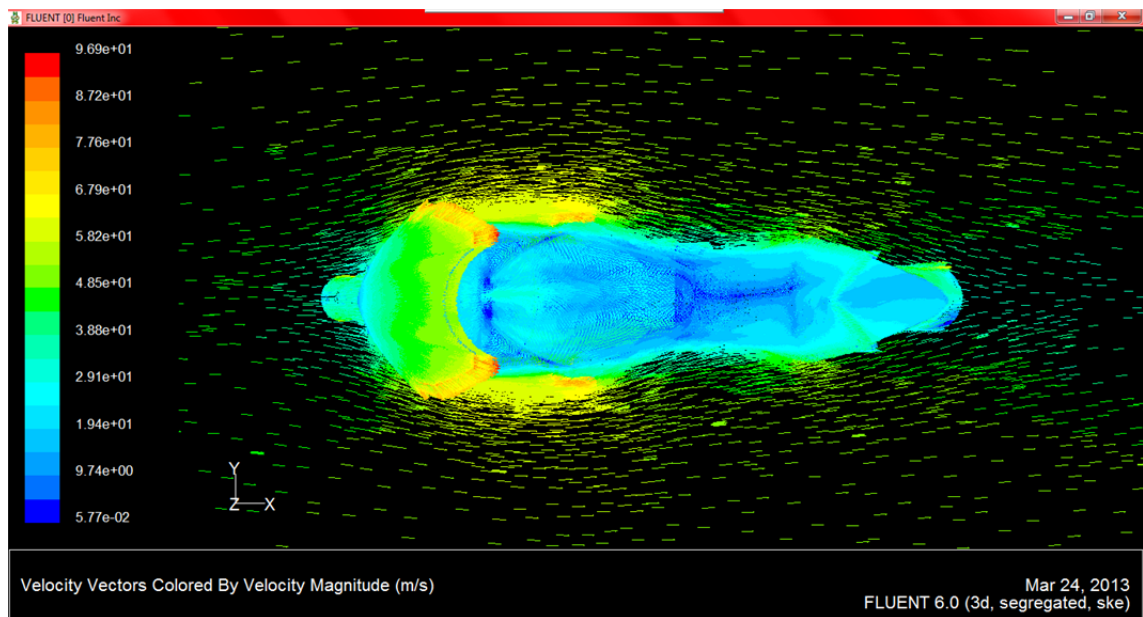


Figura 9.23.

BETA

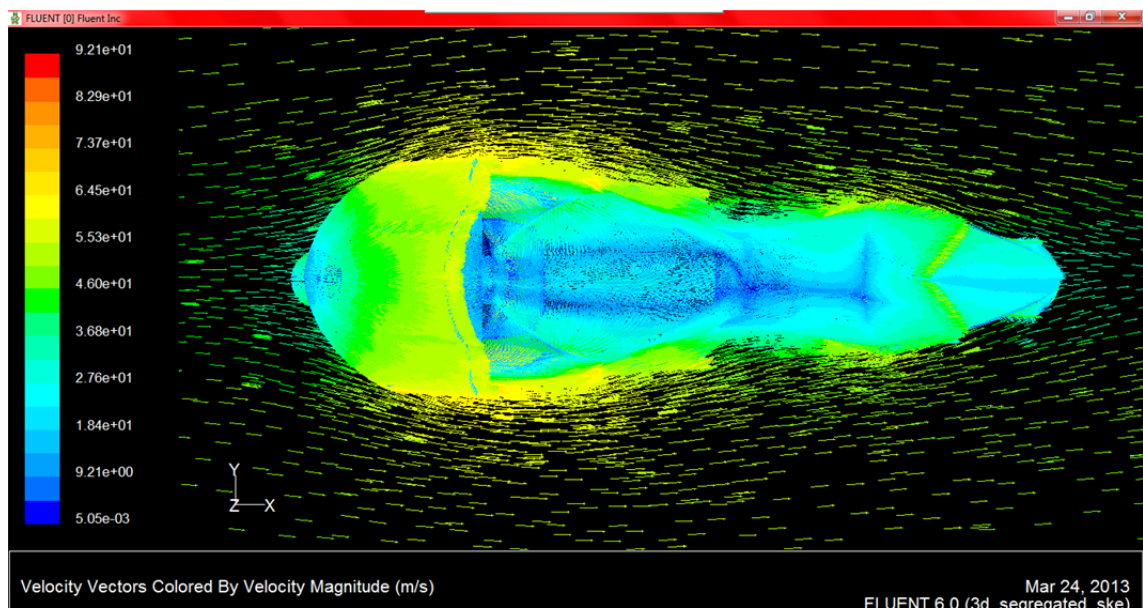


Figura 9.24.

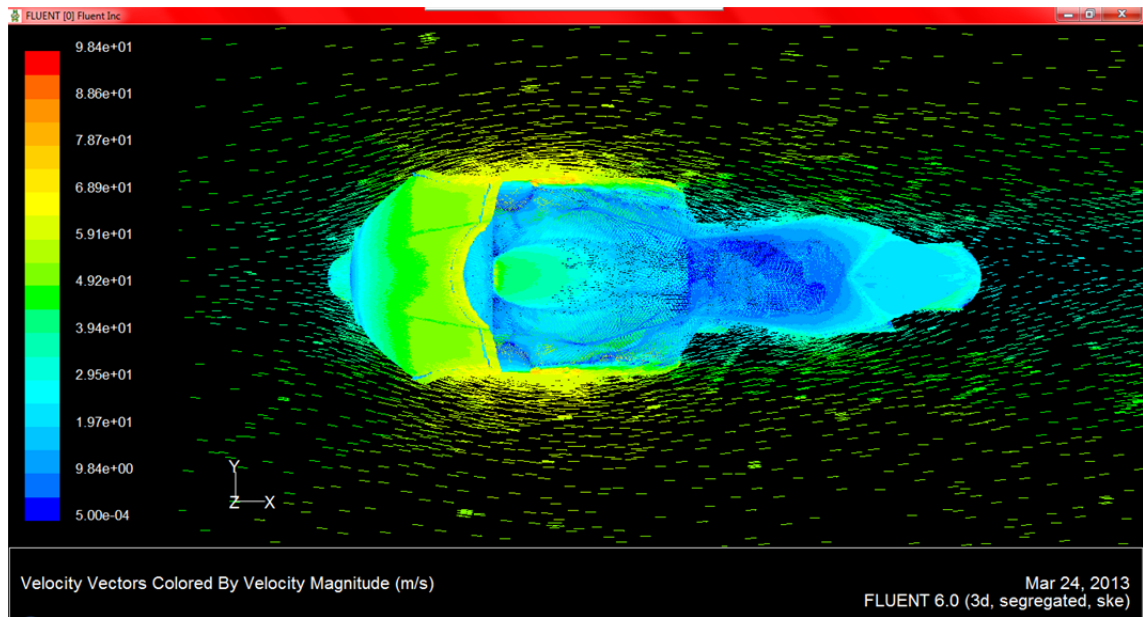


Figura 9.25.

En estas imágenes se puede apreciar la diferencia de esbeltez de los modelos BETA y Ariane 2013 con respecto al modelo Ariane 2012. También se aprecia que en la Ariane 2012 las turbulencias en la zona de la cúpula y carena lateral son más acusadas en que las otras dos motos. Siendo menores estas turbulencias en la Ariane 2013, con lo que reafirmamos que el perfil aerodinámico de esta última es mejor que el de los otros dos modelos.

9.2.4 Comparación de estelas

En este apartado se va ver las estelas que dejan tras de sí los tres modelos y se va realizar un pequeño estudio comparativo de las mismas, ya que como se ha mencionado con anterioridad, no sólo hay que preocuparse por la resistencia aerodinámica en la parte delantera sino que también hay que estudiar lo que ocurre trasera, ya que si la depresión es muy grande esto puede llegar a ser un problema bastante importante porque perjudica el avance del vehículo.

Las comparaciones de las estelas se van a ver en función de la velocidad, turbulencia generada, gradiente de presiones, energía cinética de la turbulencia y viscosidad.

En función de la velocidad

Ariane 2012

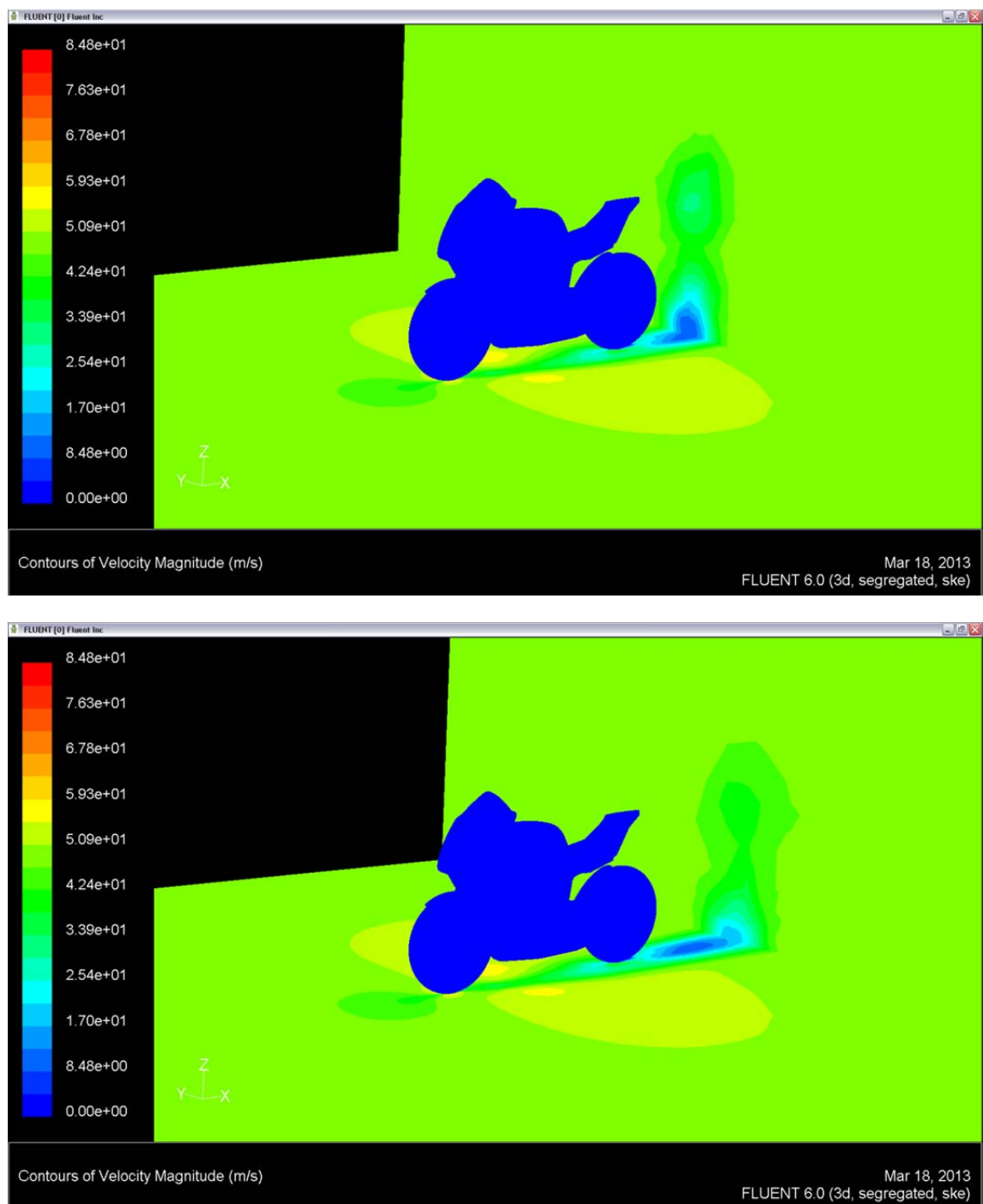


Figura 9.26.

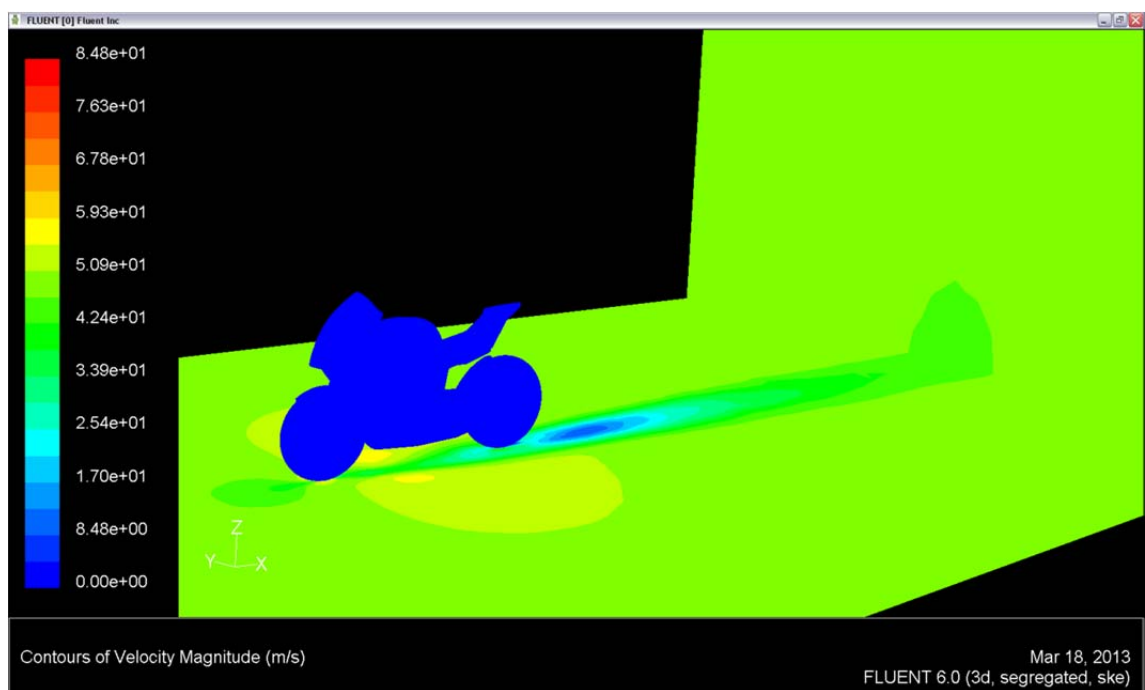
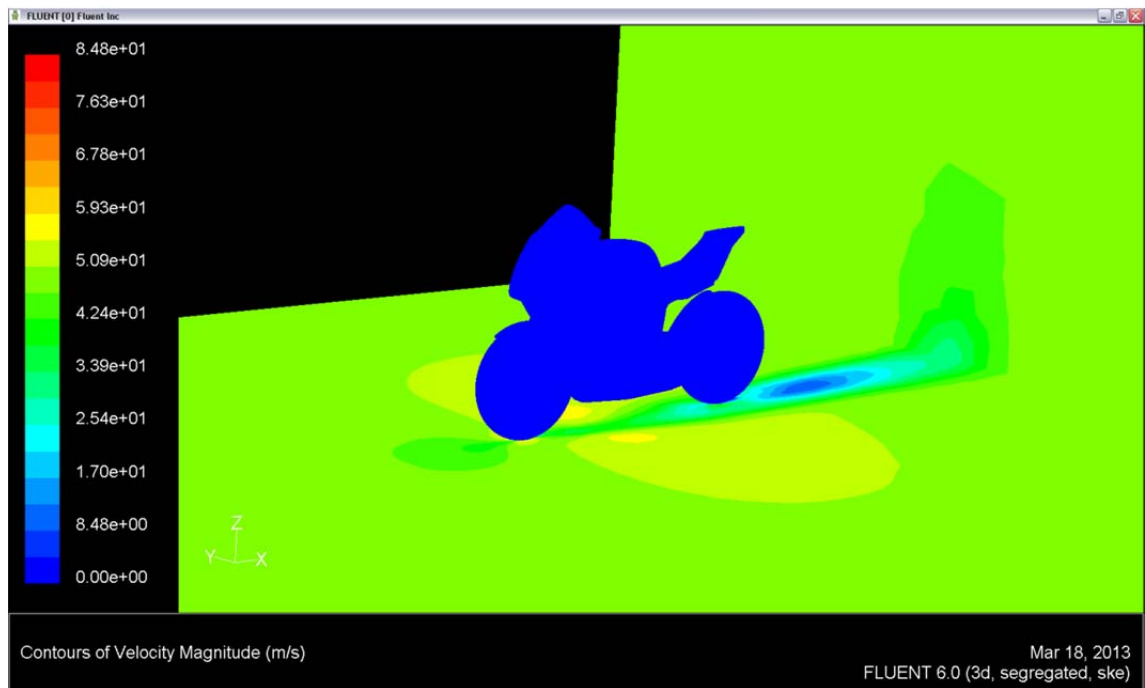


Figura 9.27.

BETA

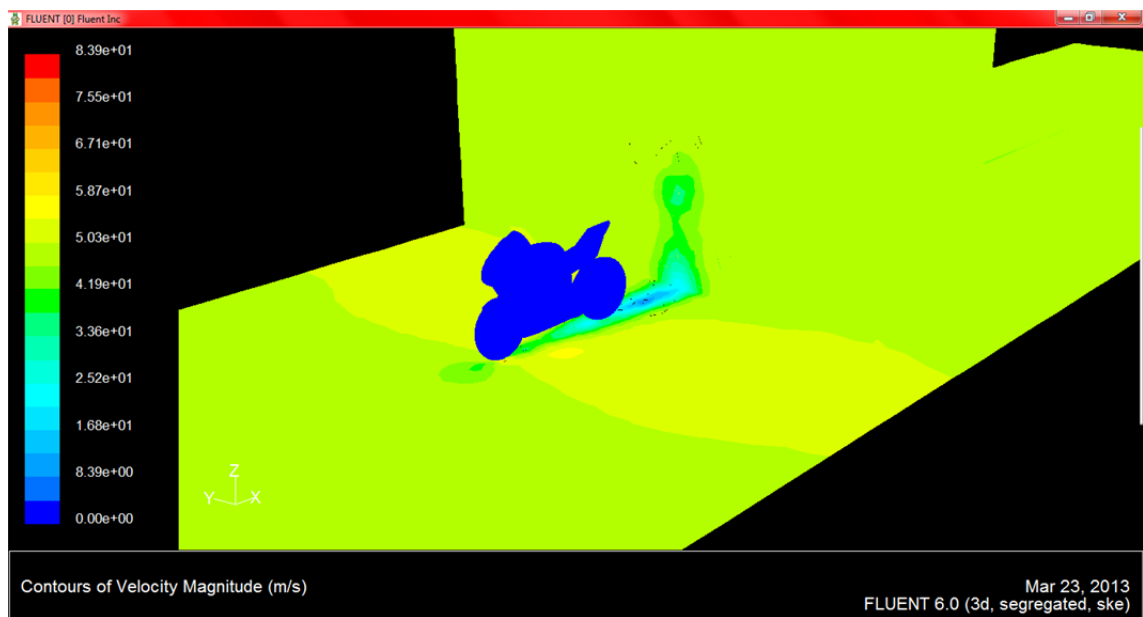
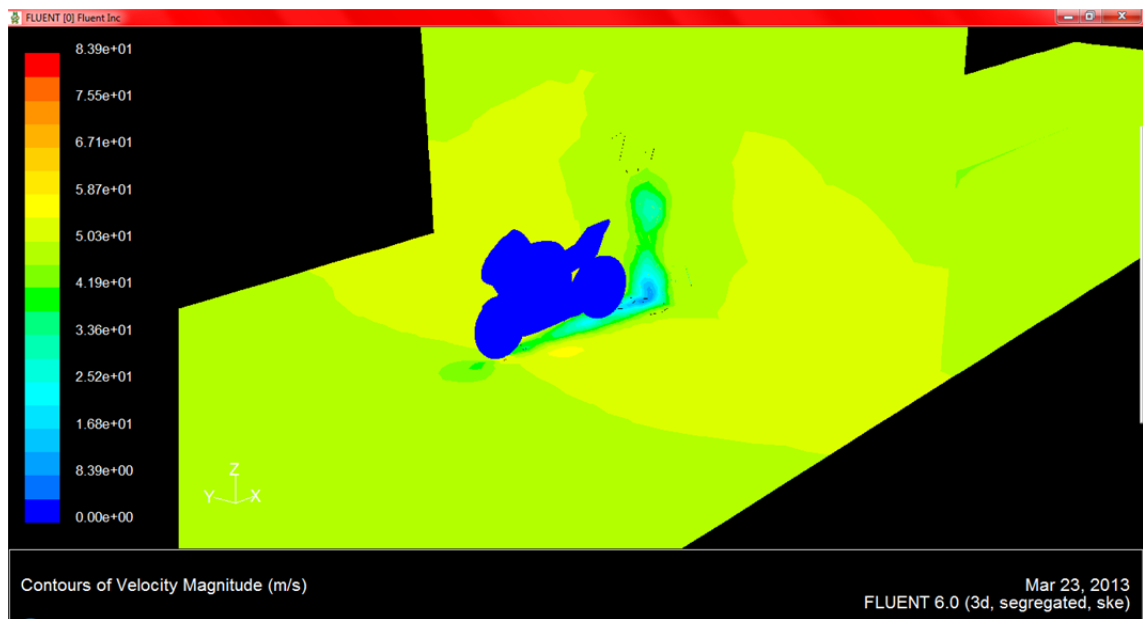


Figura 9.28.

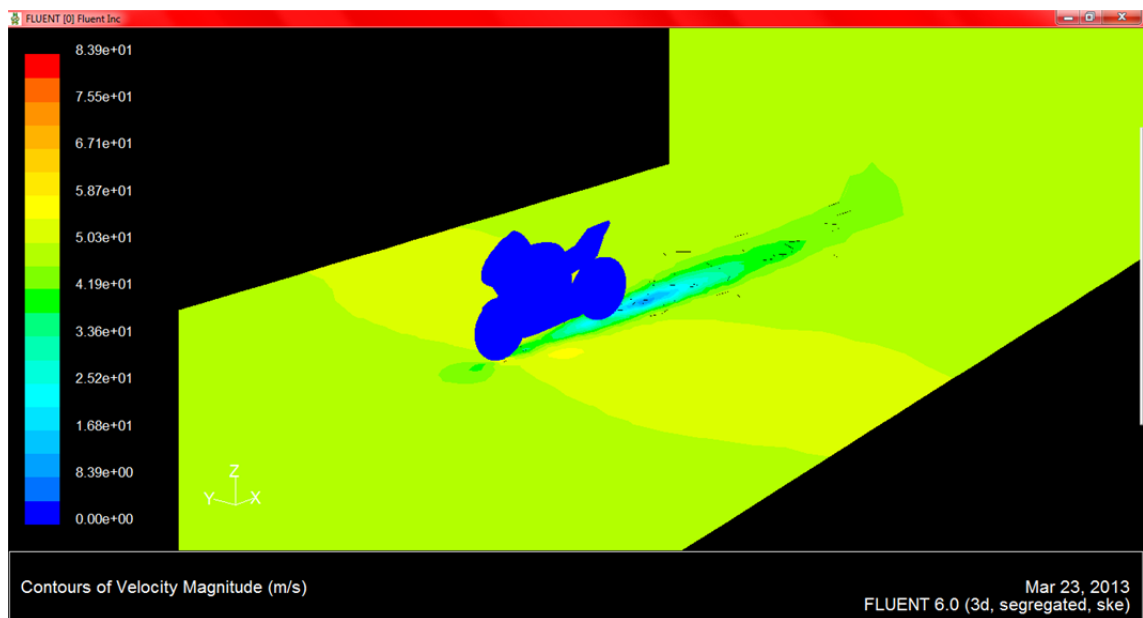
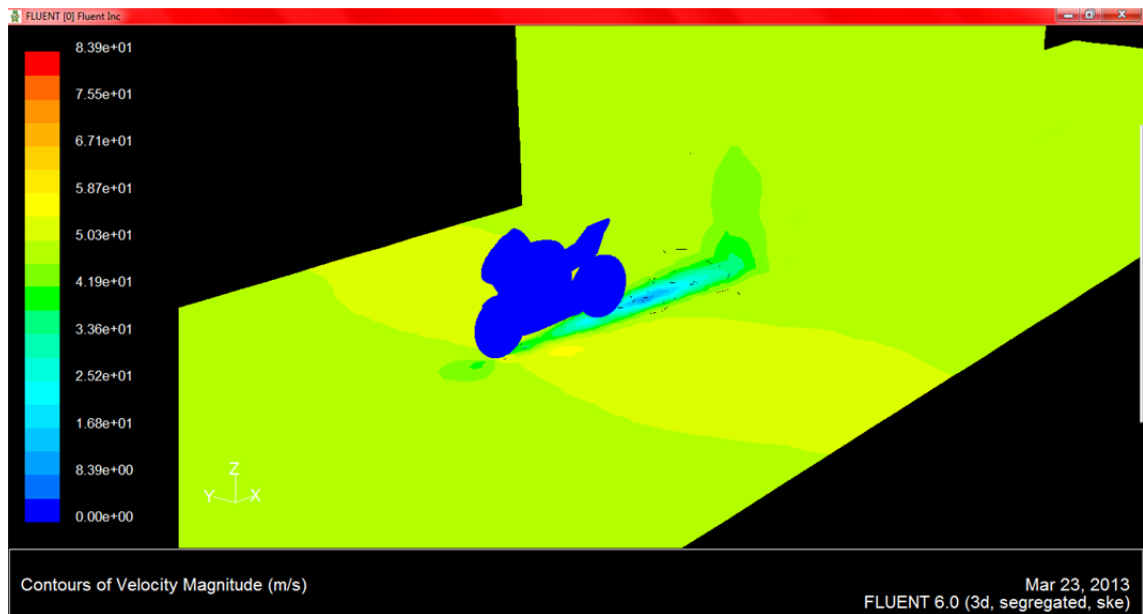


Figura 9.29.

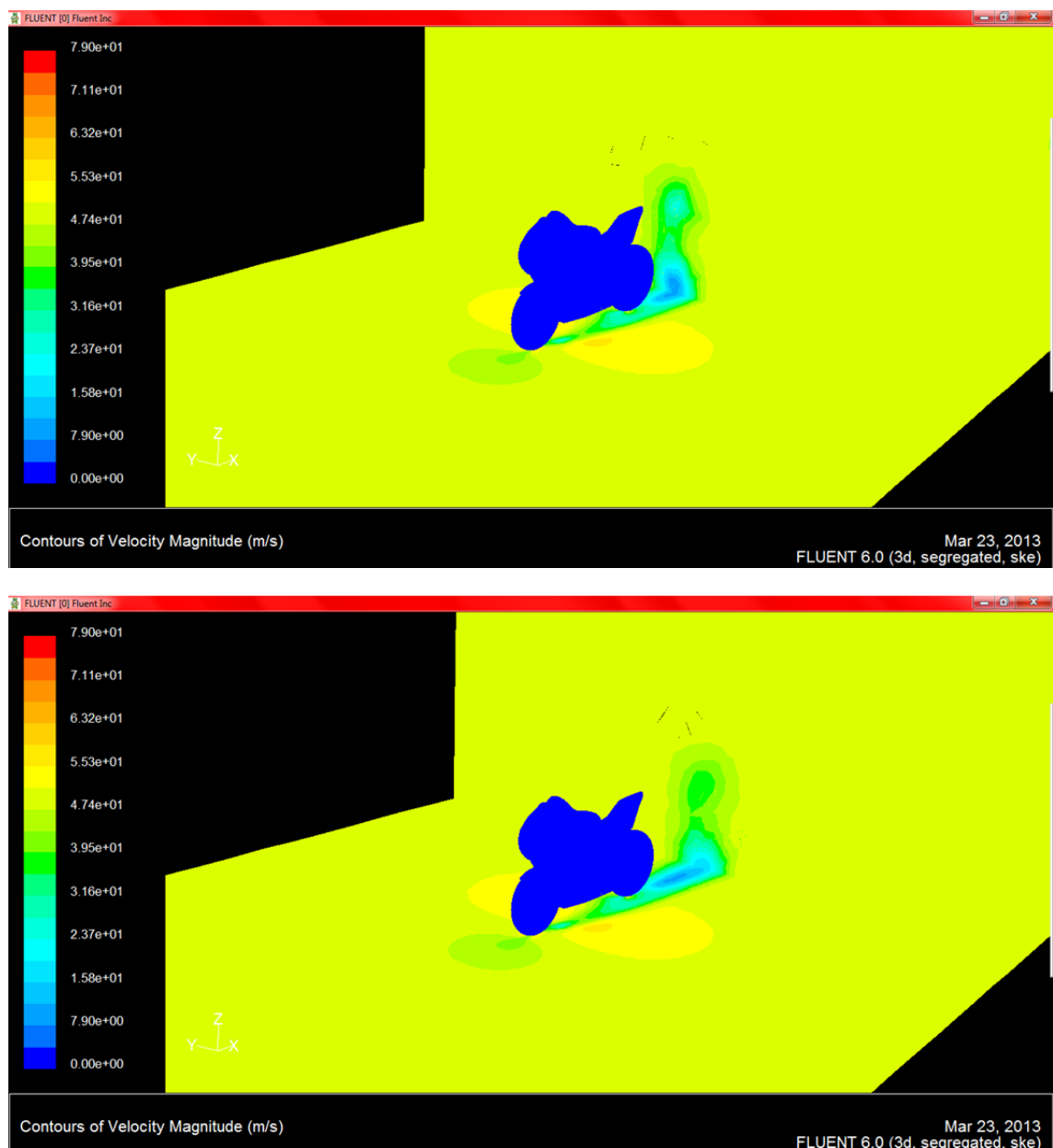


Figura 9.30.

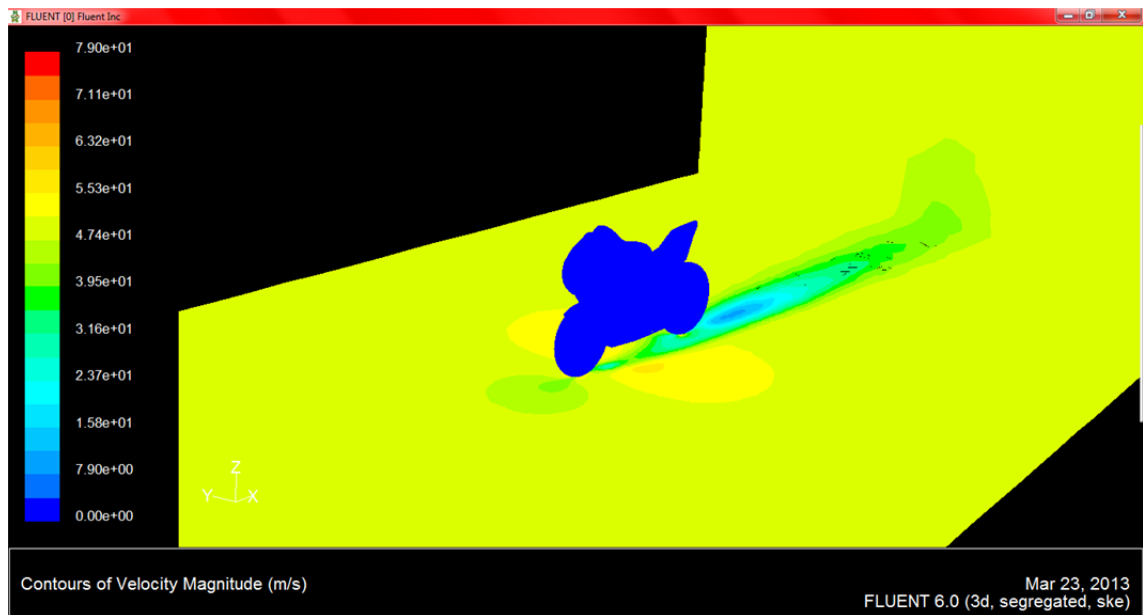
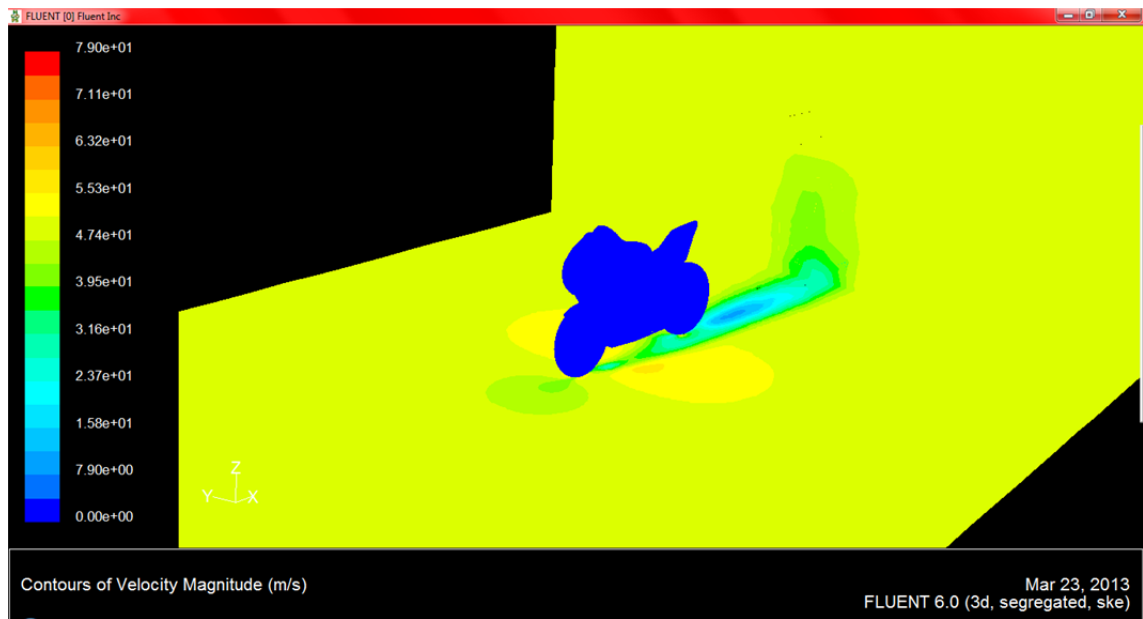


Figura 9.31.

En función de las turbulencias

Ariane 2012

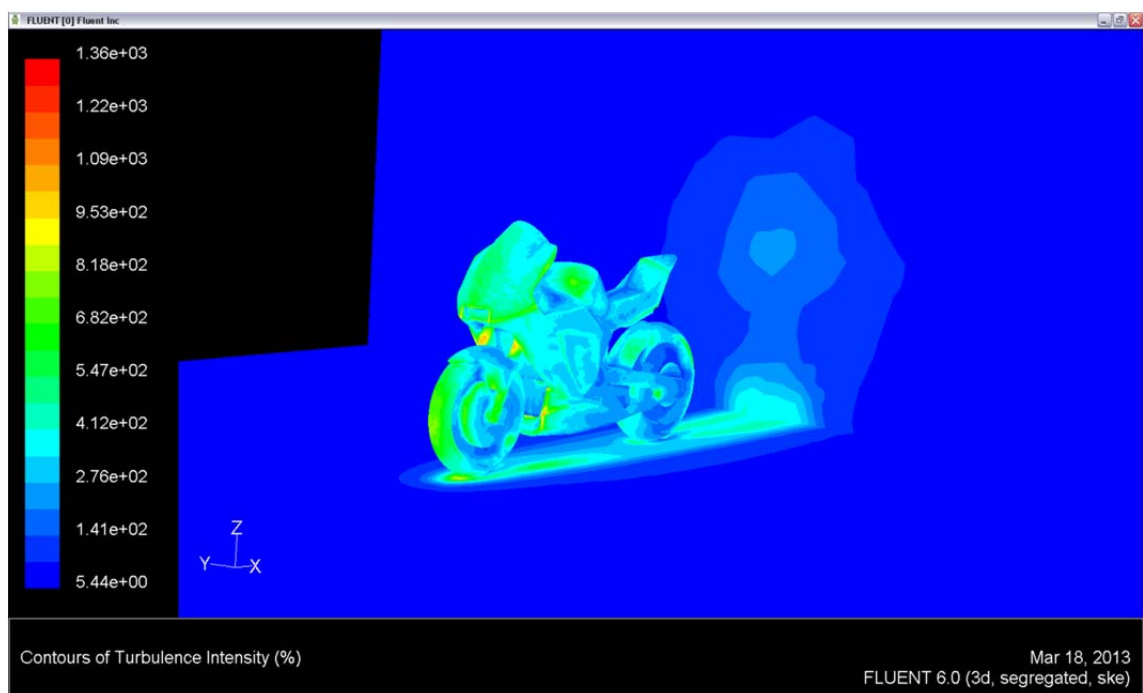
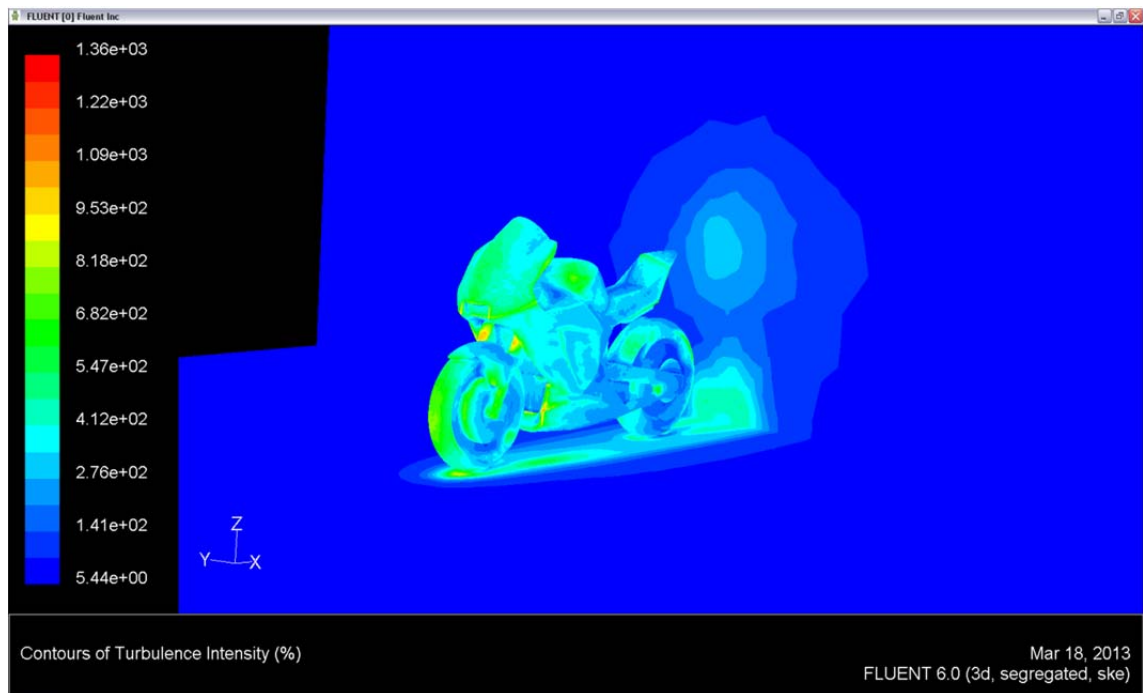


Figura 9.32.

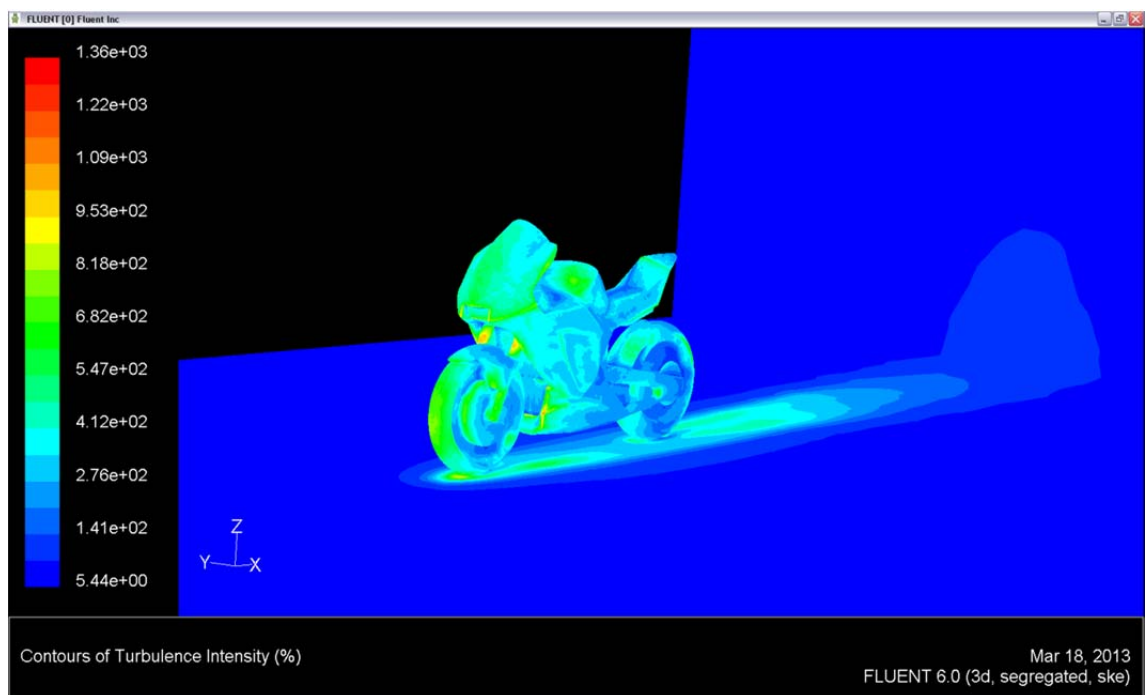
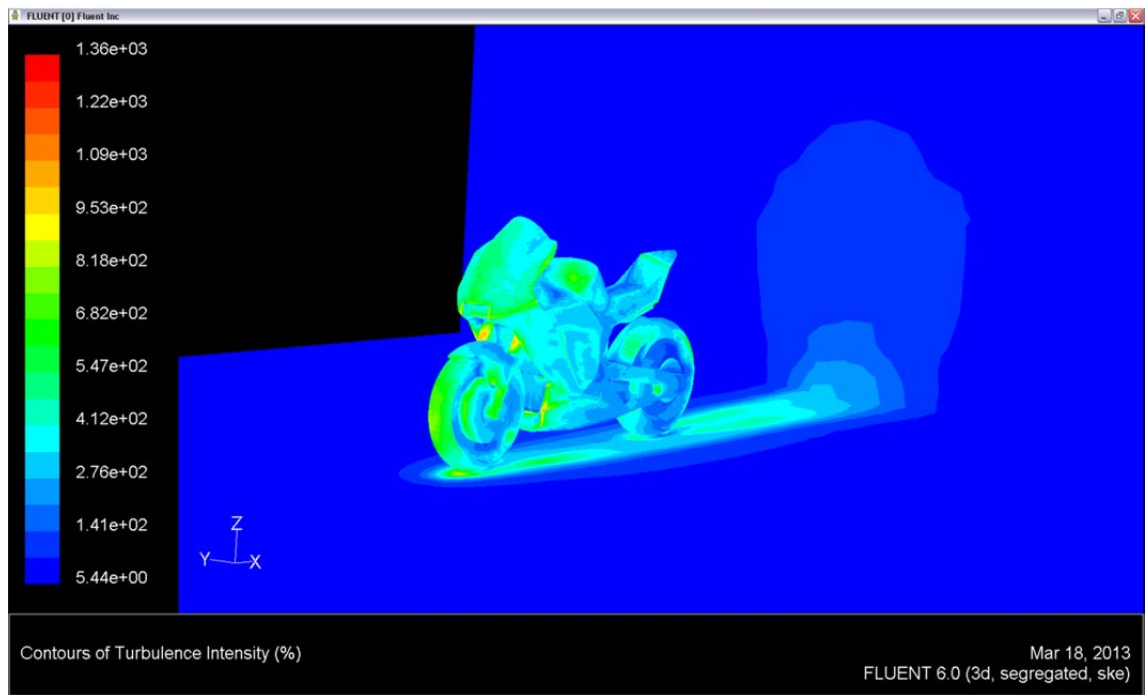


Figura 9.33.

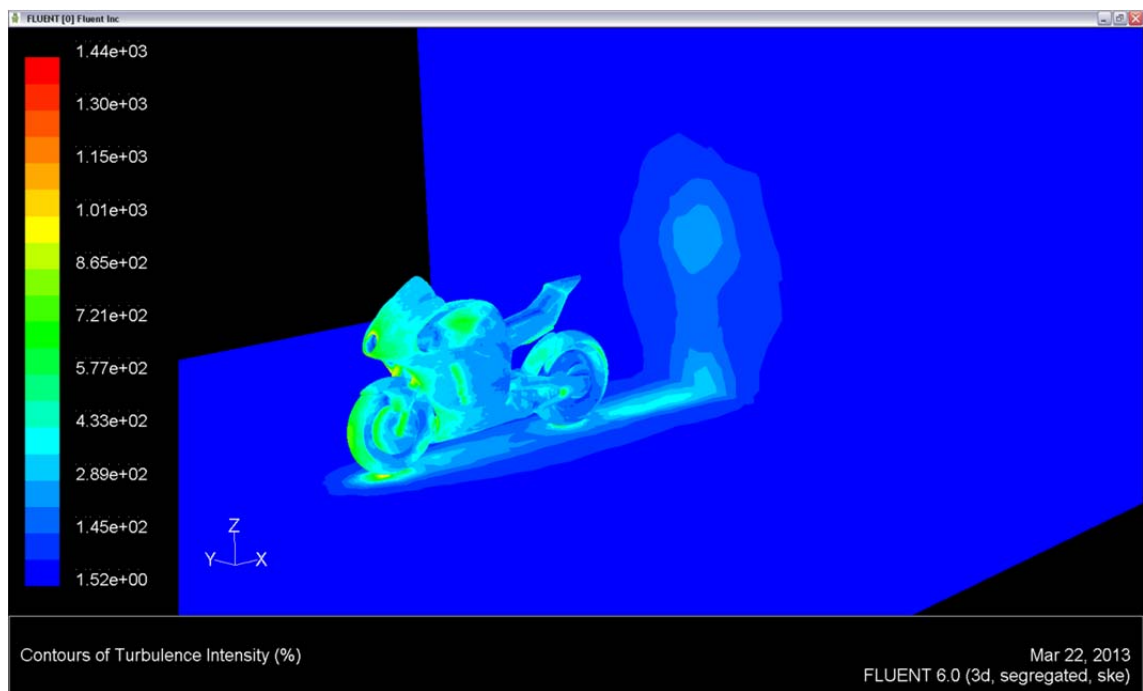
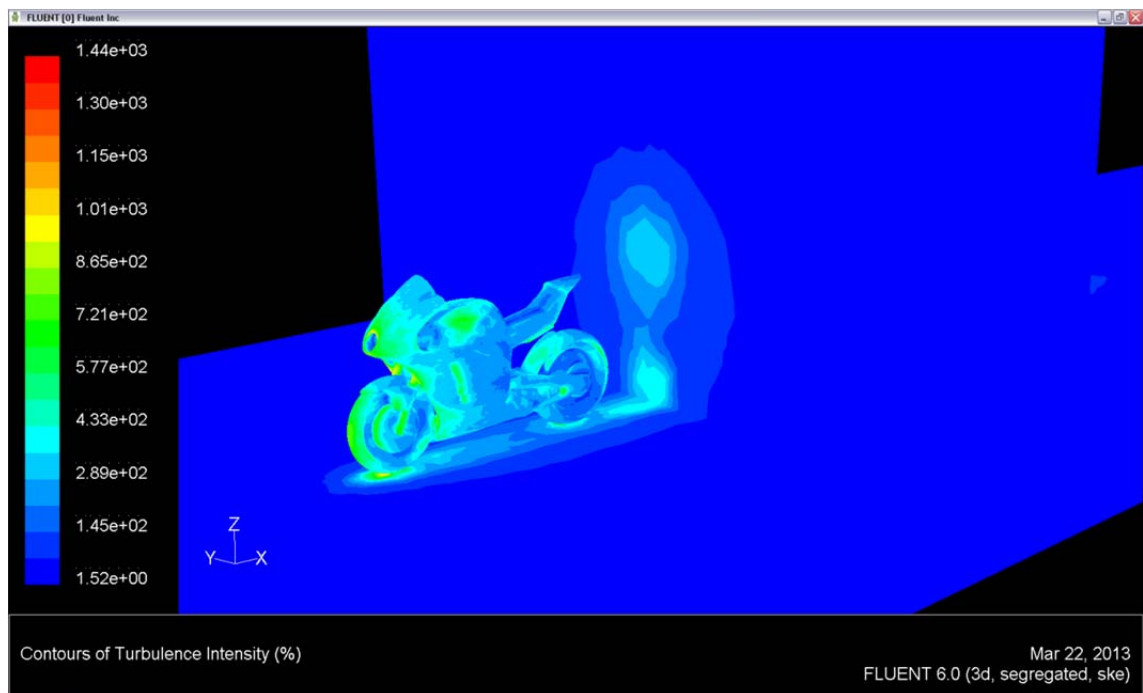


Figura 9.34.

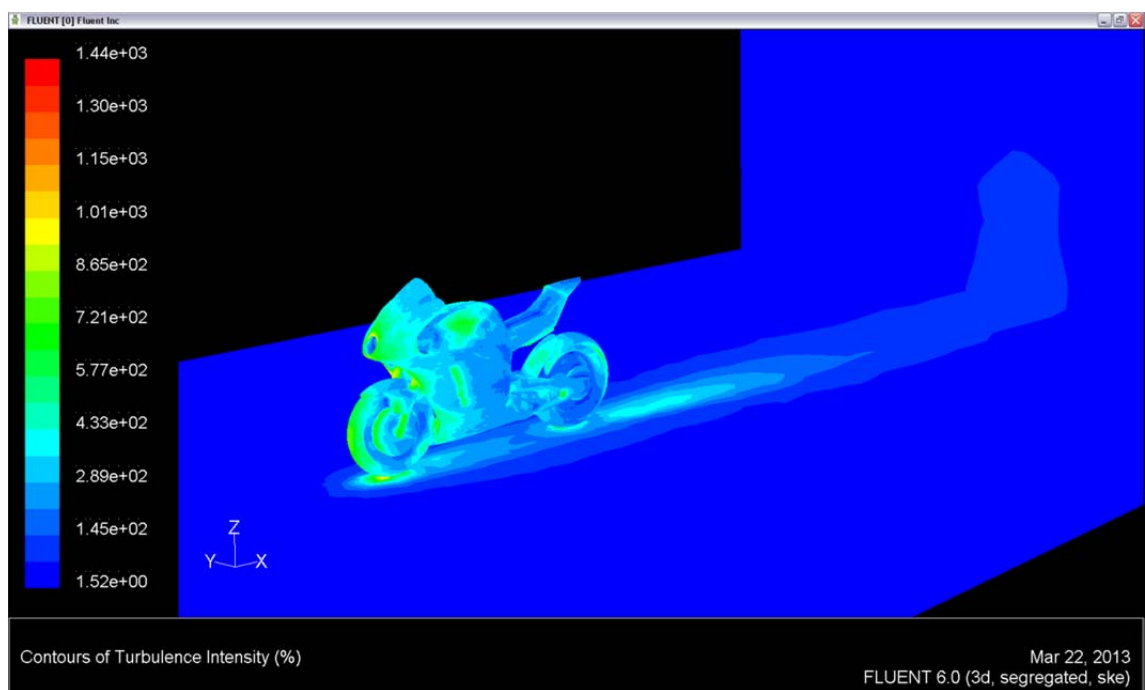
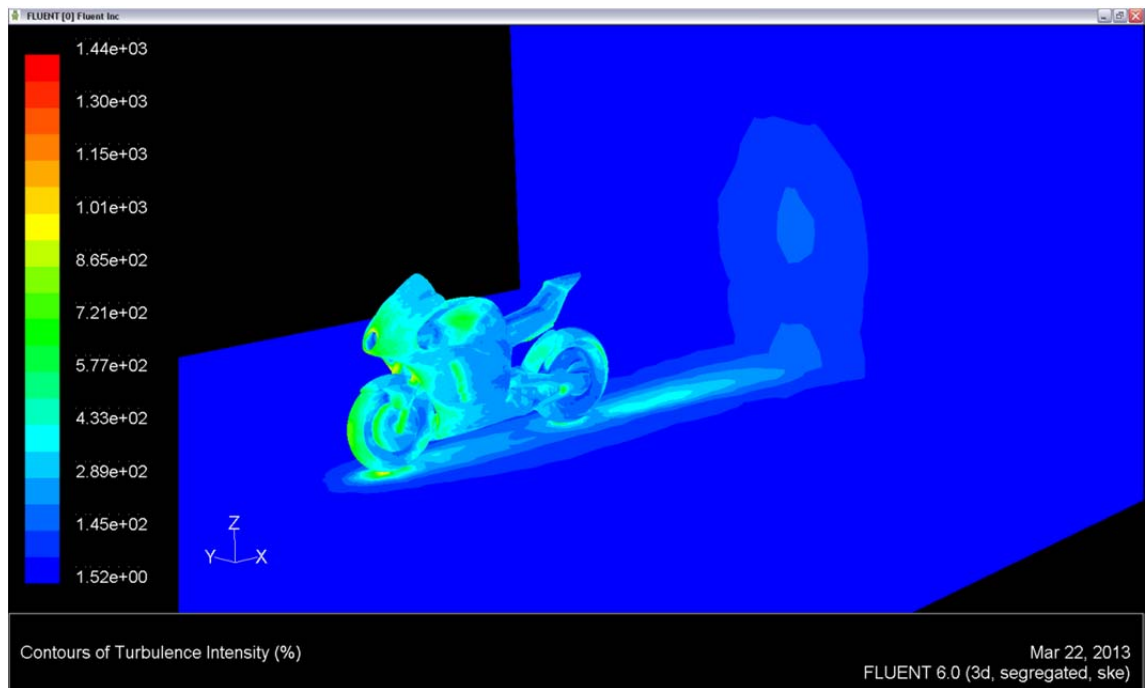


Figura 9.35.

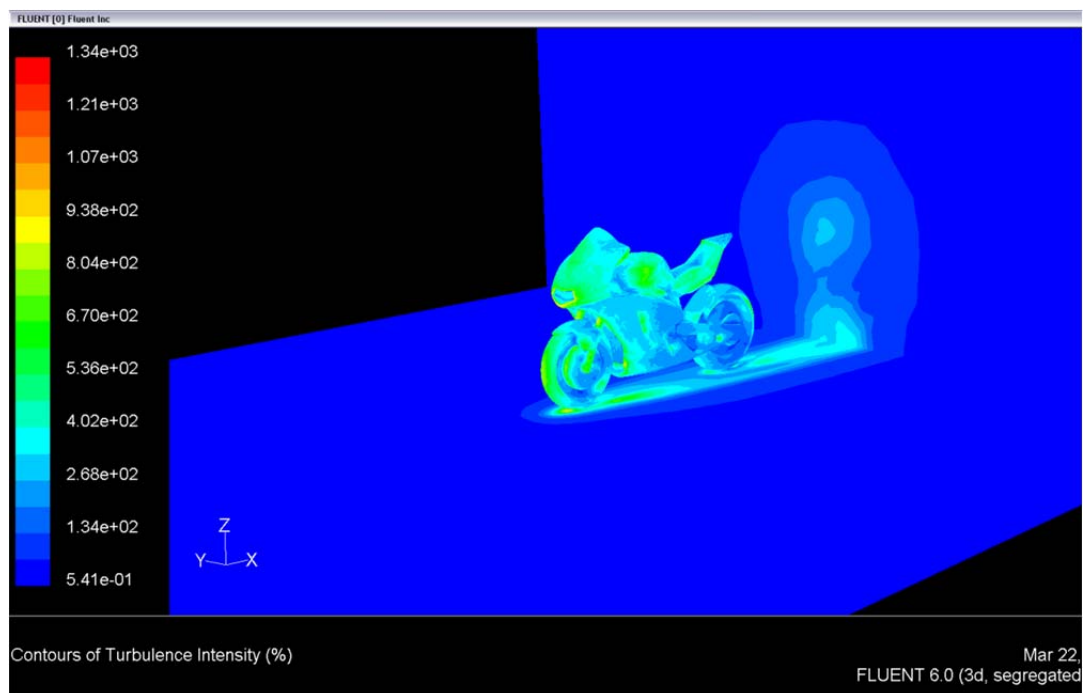
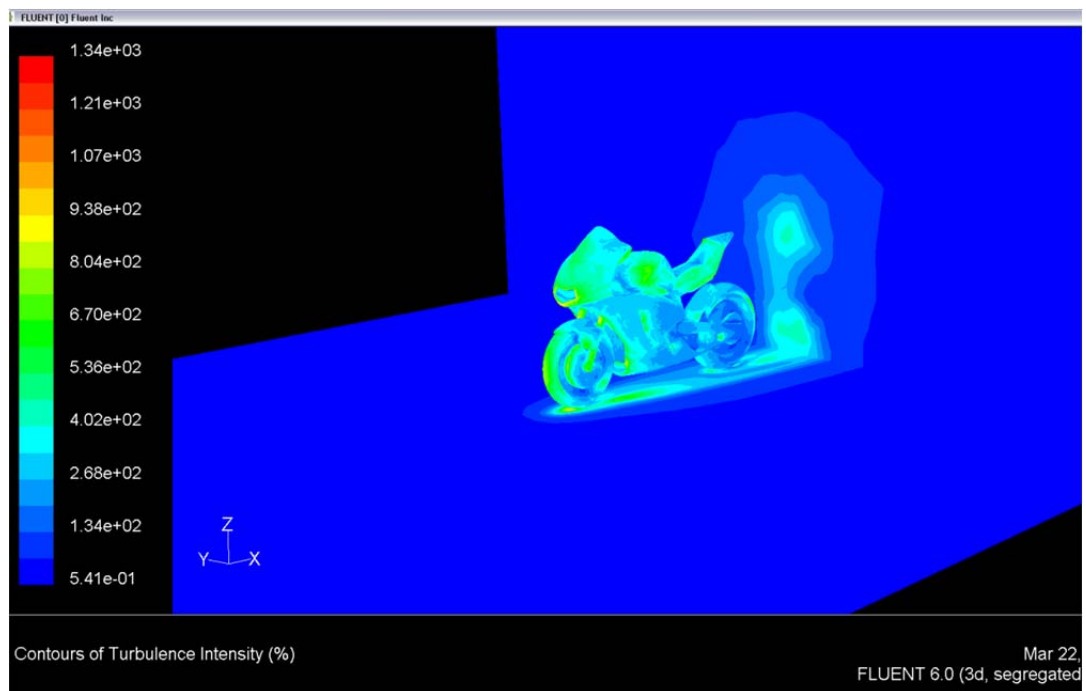


Figura 9.36.

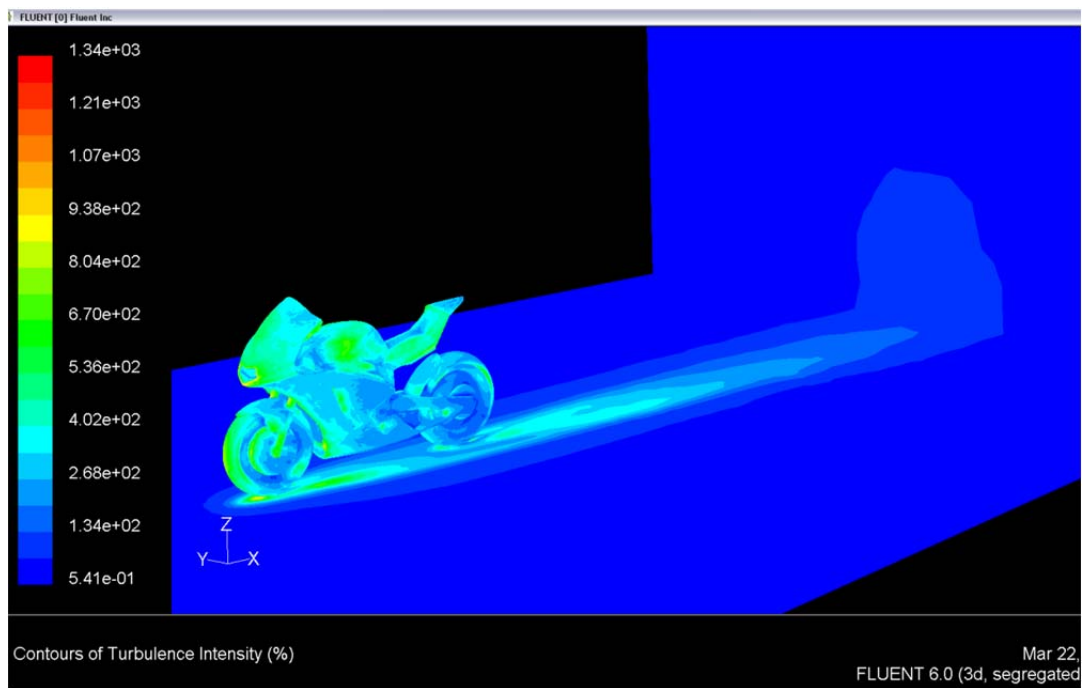
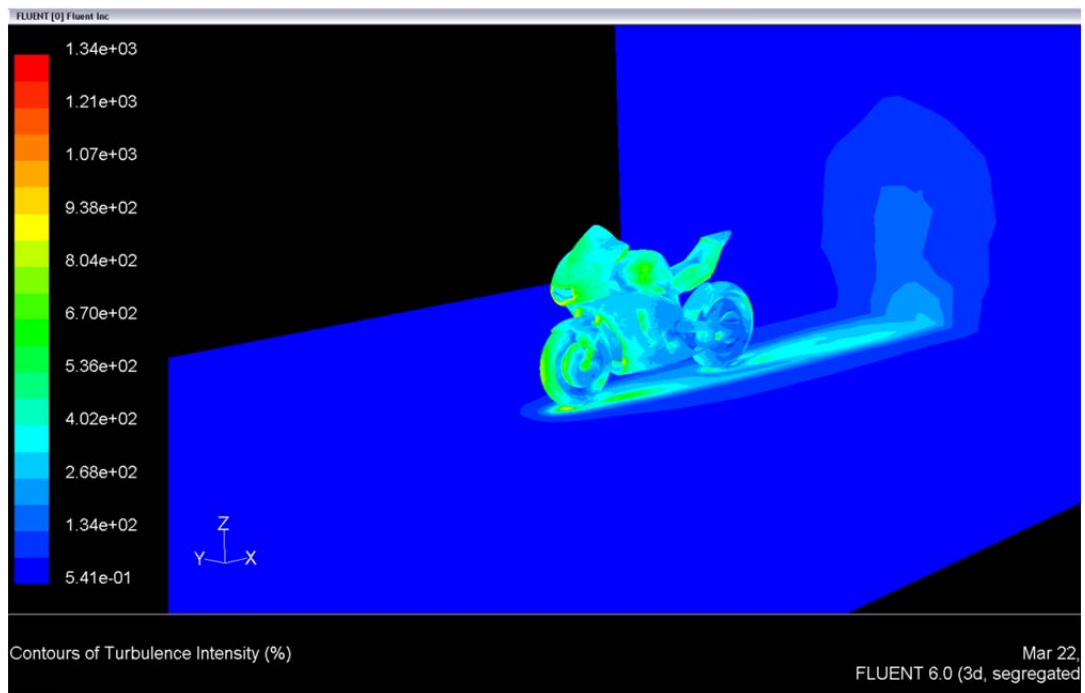


Figura 9.37.

En función de la viscosidad

Ariane 2012

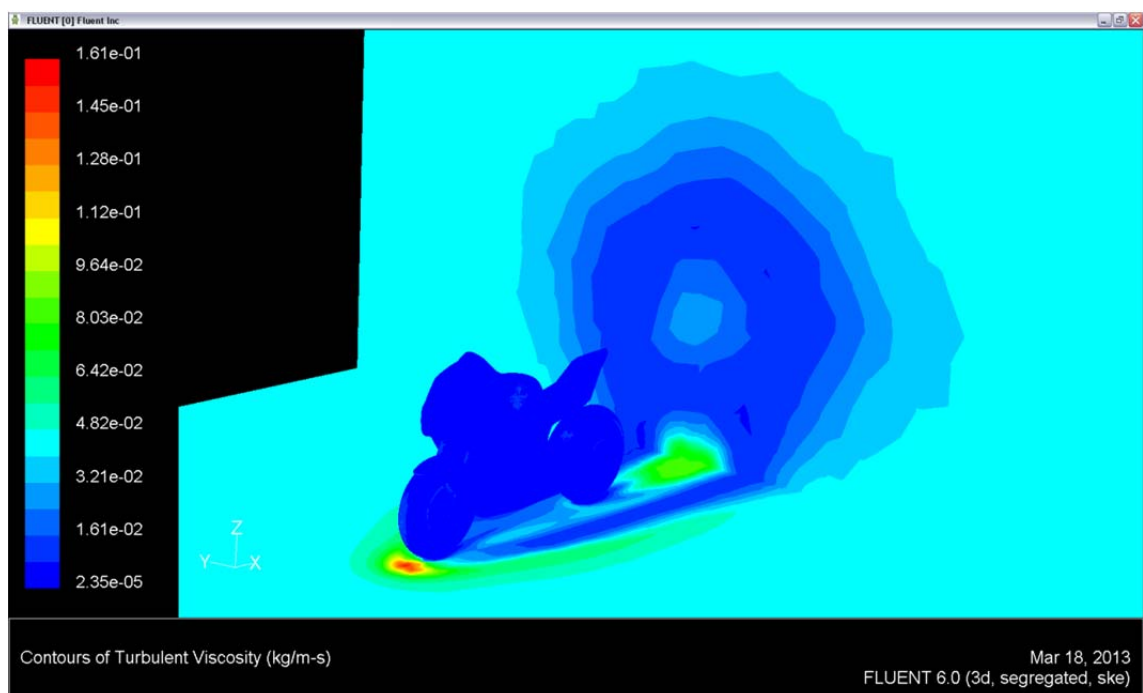
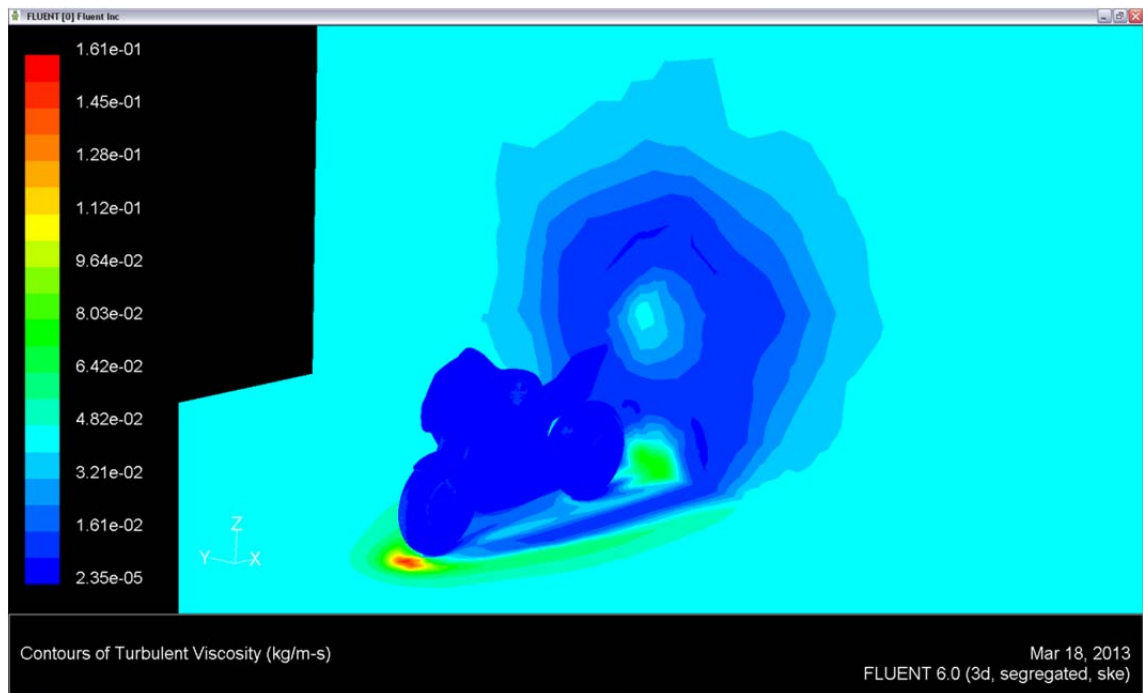


Figura 9.38.

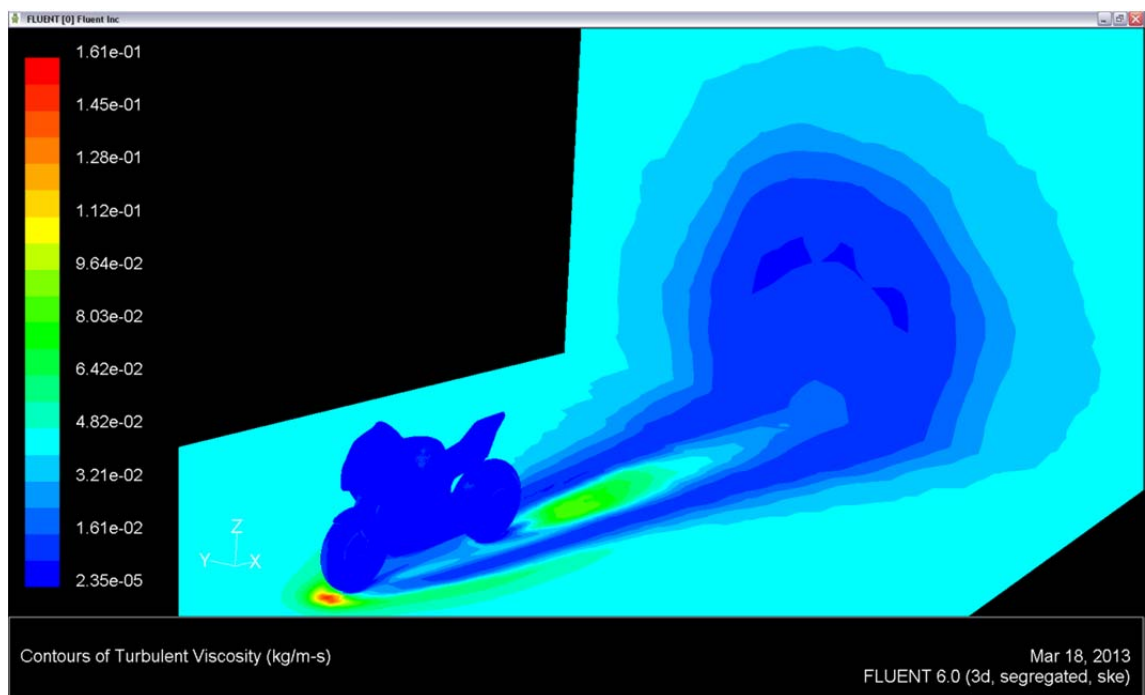
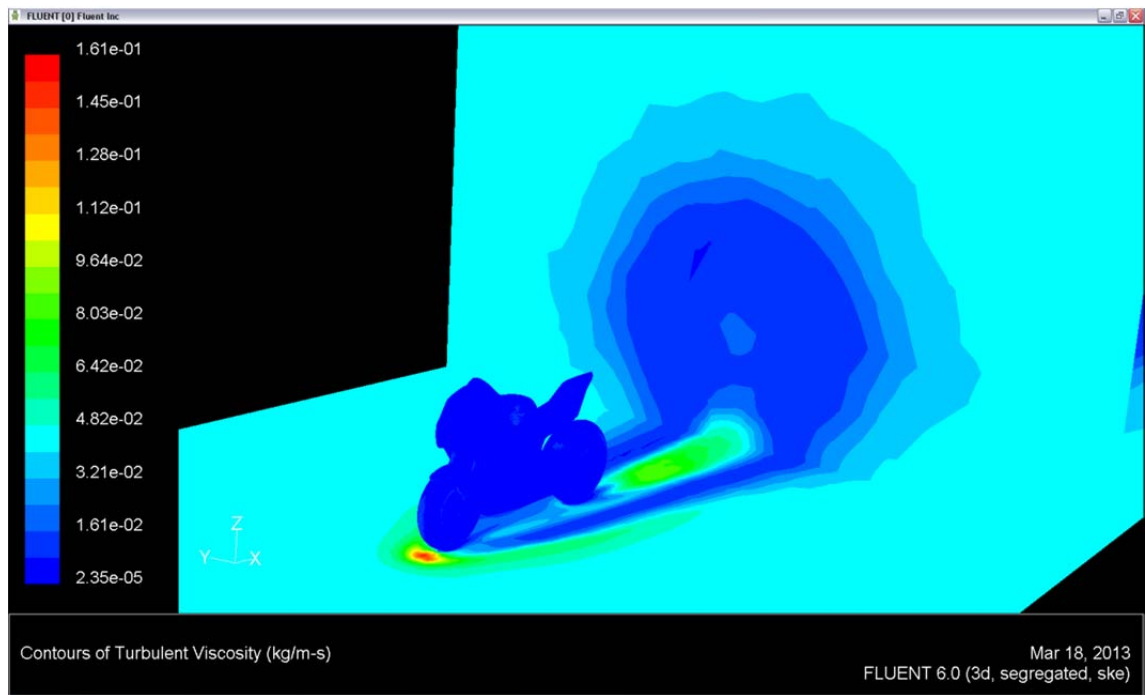


Figura 9.39.

BETA

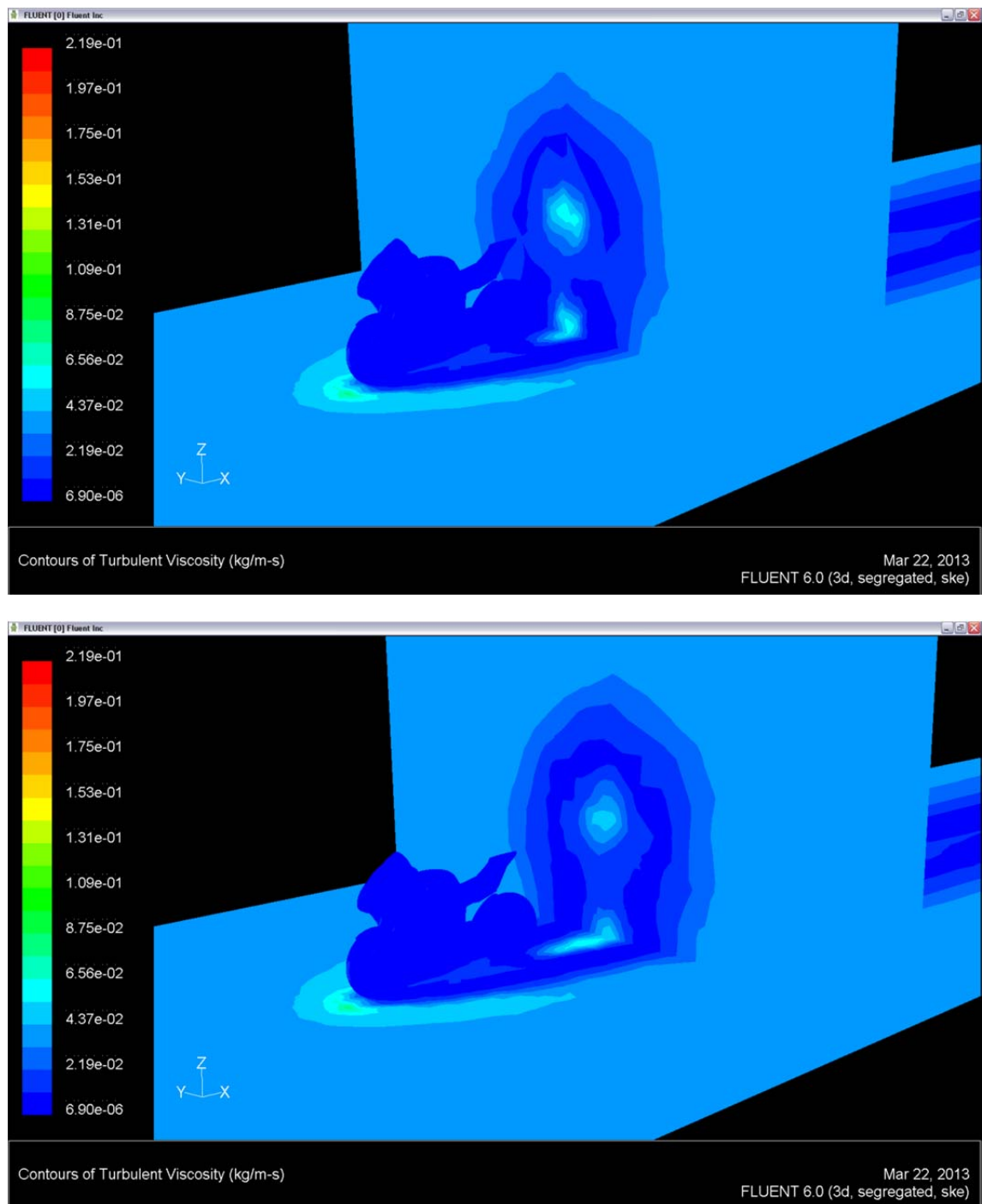


Figura 9.40.

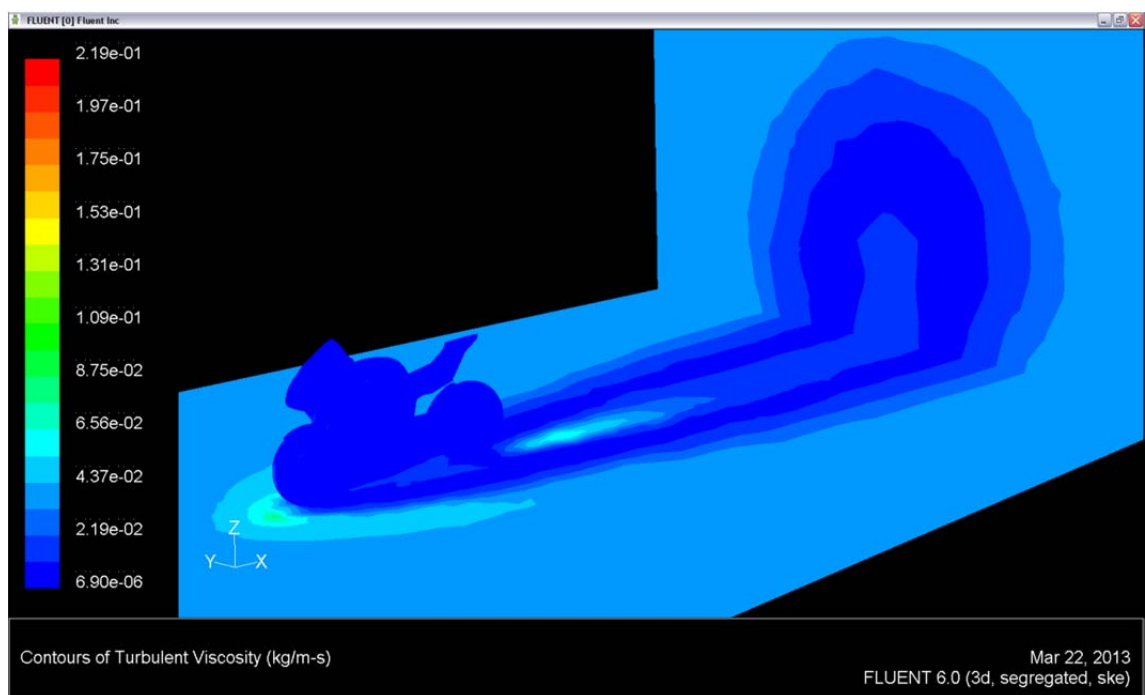
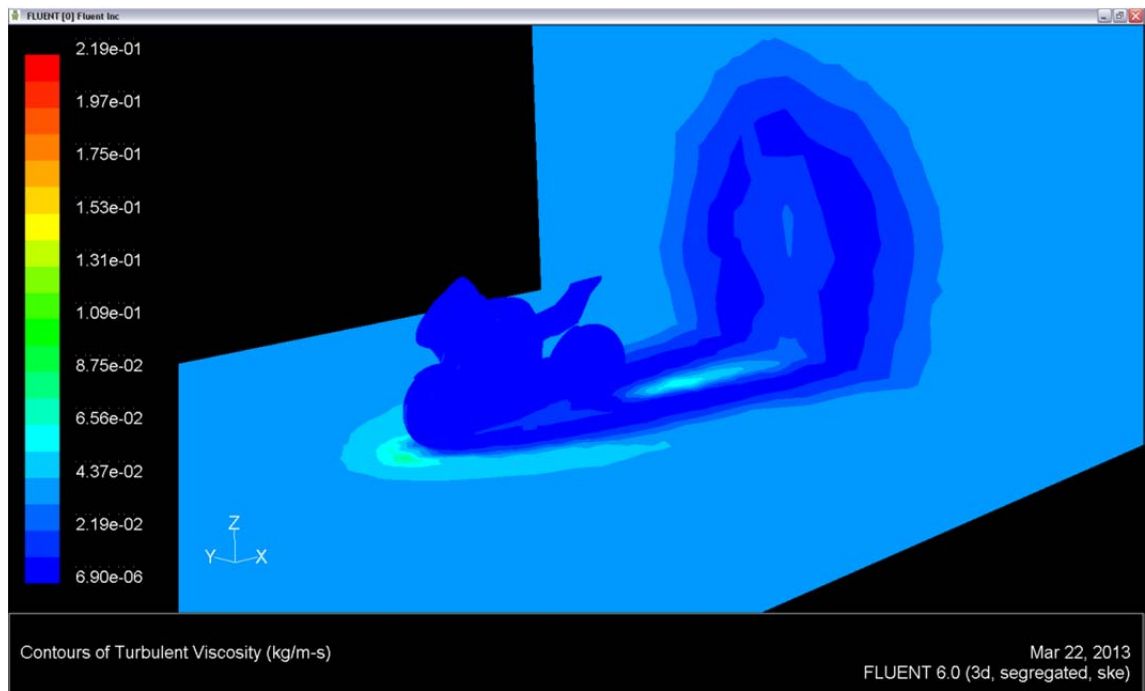


Figura 9.41.

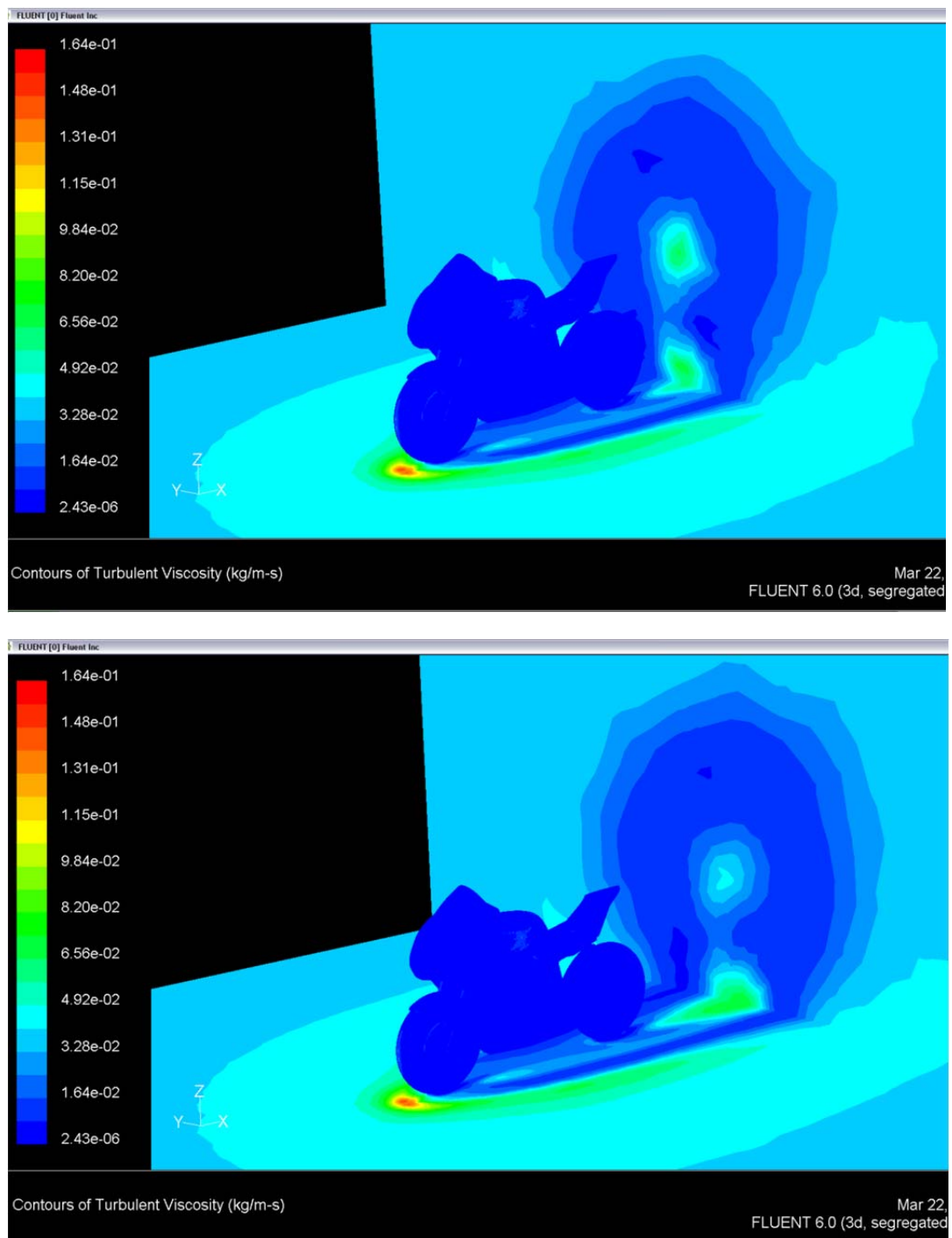


Figura 9.42.

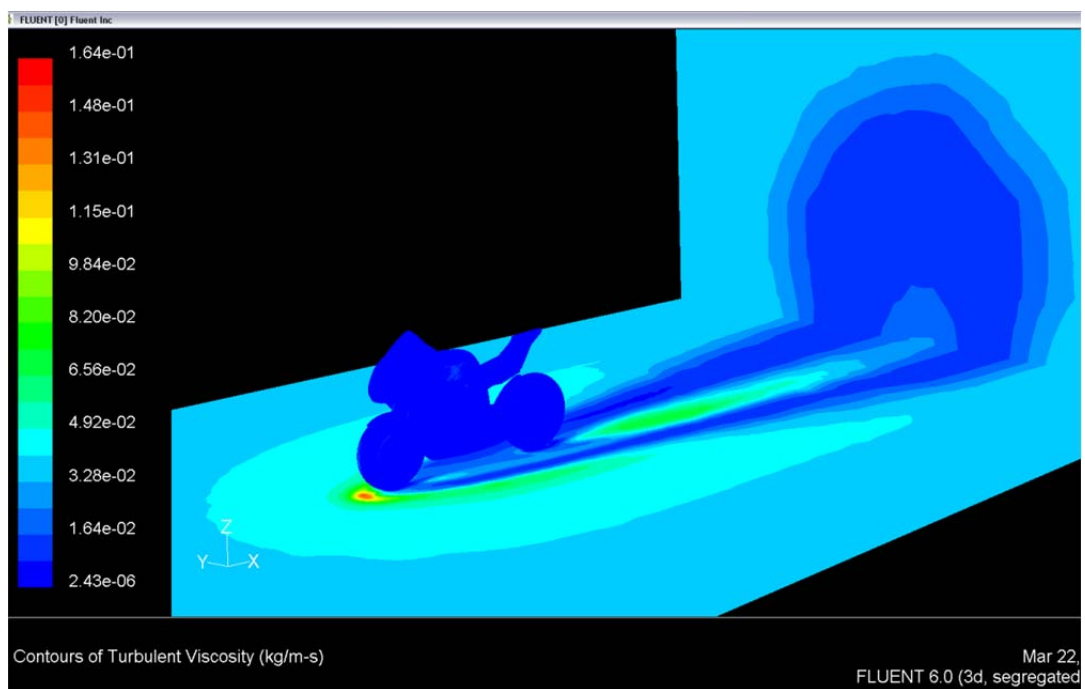
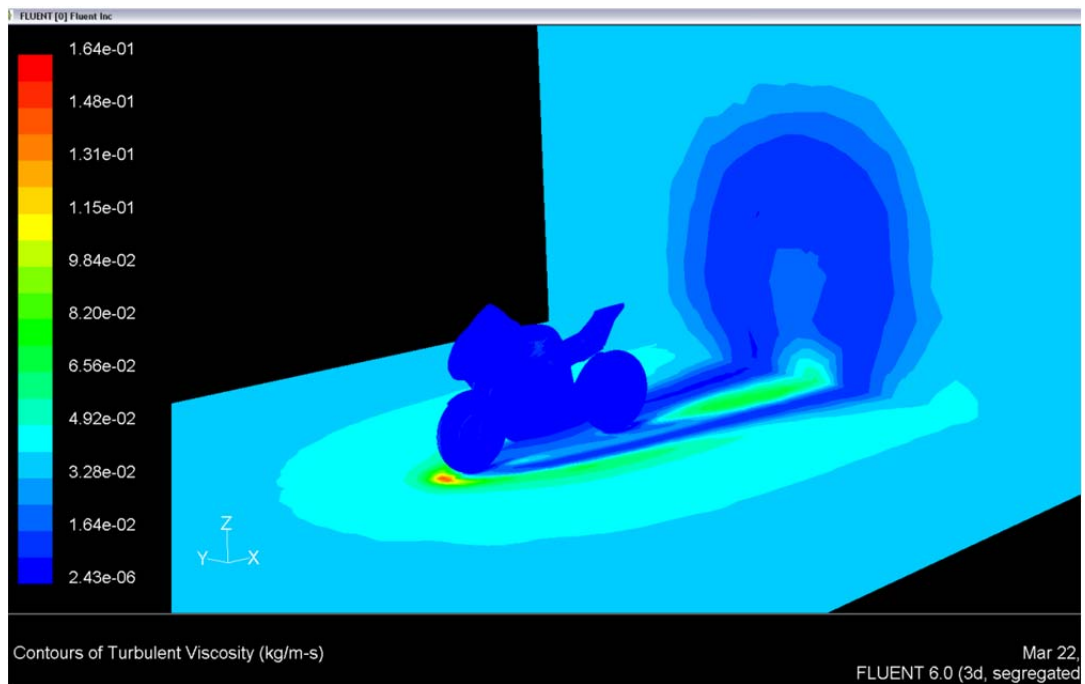


Figura 9.43.

9.2.5 Comparación de estelas de forma analítica

A la hora de realizar esta comparación se han exportado a Excel una serie de datos obtenidos en Fluent, en función de la velocidad media en el eje longitudinal o eje X.

Este estudio se ha realizado comparando los datos obtenidos de los planos transversales a unas distancias de 0,5m, 1m, 2m y 5m respectivamente en la parte trasera de las motocicletas. A medida que nos vamos alejando, la estela se hace mayor, por lo que se ha ido aumentando la precisión introduciendo una mayor cantidad de datos. Según esto, los planos situados a 0,5m y 1 m son de 21x21 celdas de 10x10 cm, los planos a 2m son de 31x31 celdas y los situados a 5m son de 41x41 celdas.

Ariane 2012

A 0,5m

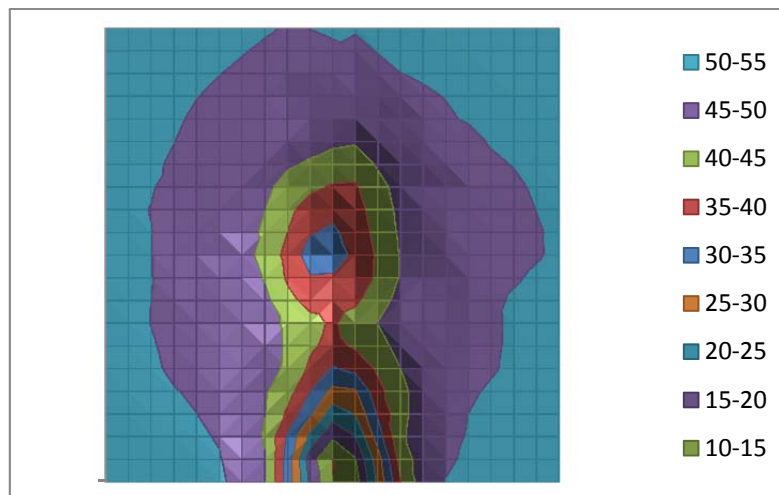


Figura 9.44.

A 1m

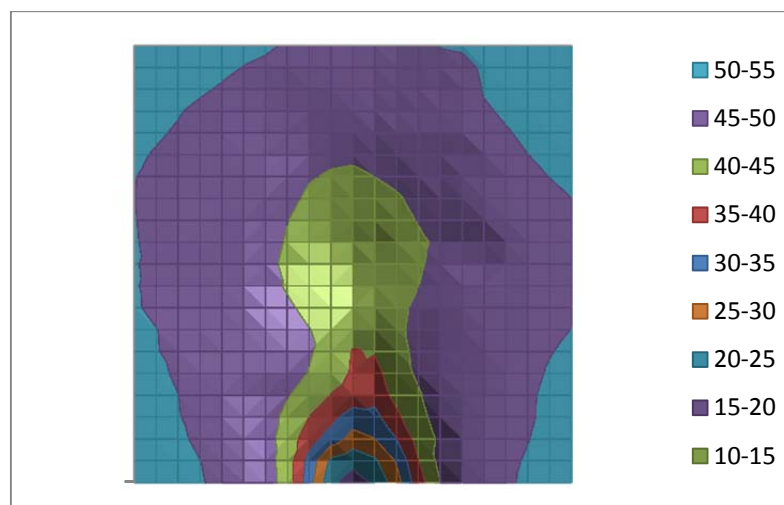


Figura 9.45.

A 2m

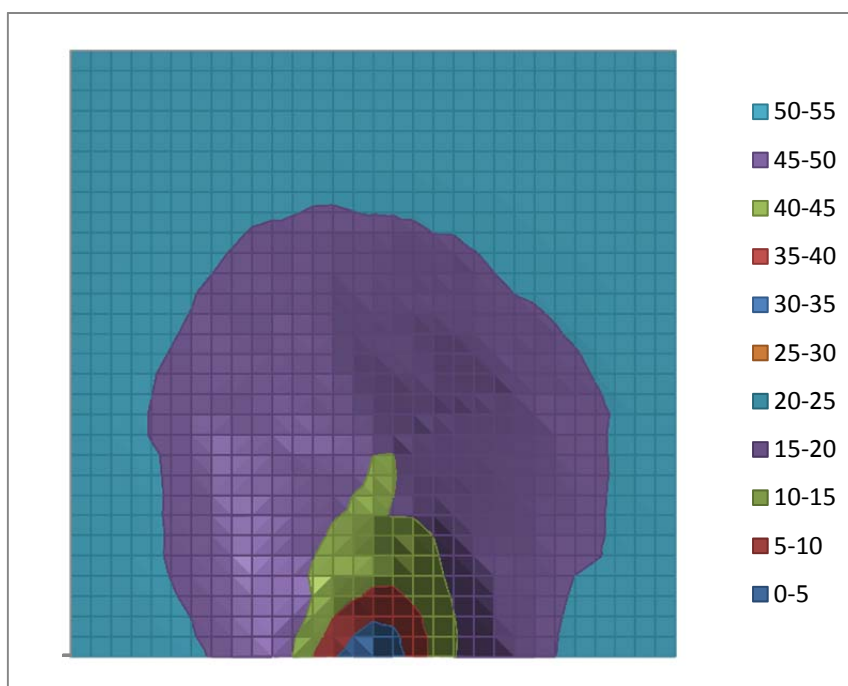


Figura 9.46.

A 5m

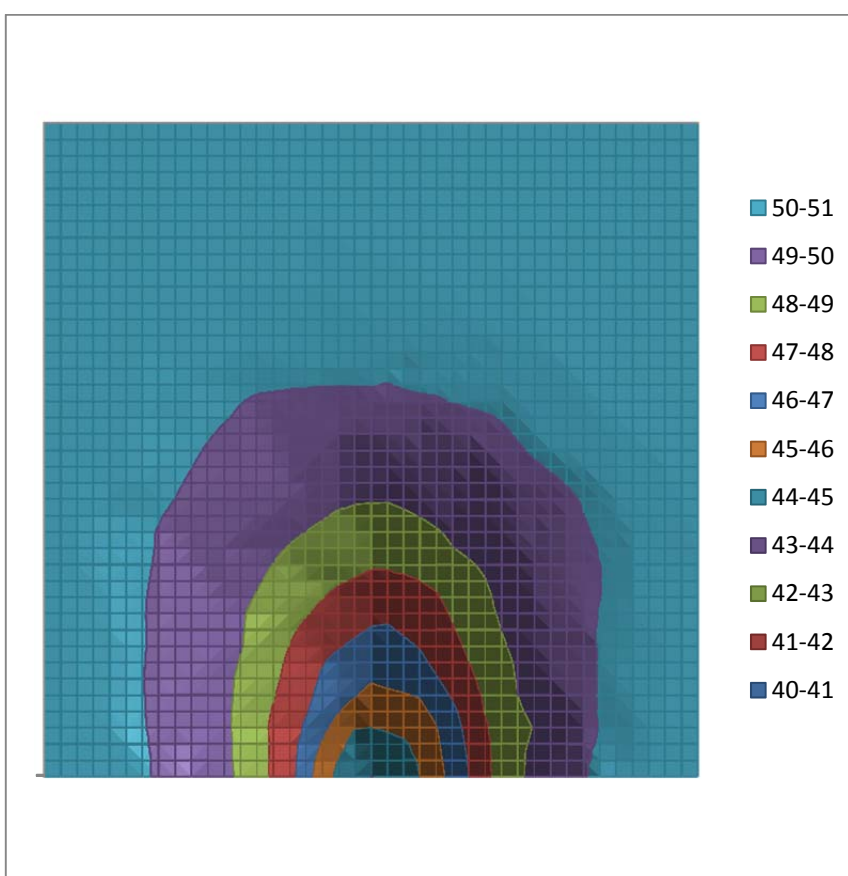


Figura 9.47.

BETA

A 0,5m

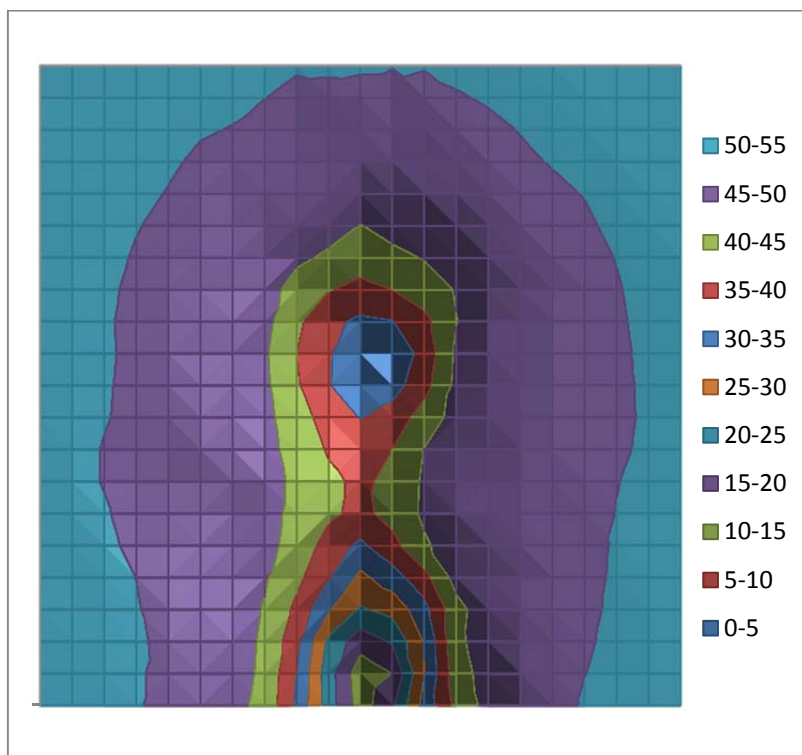


Figura 9.48.

A 1m

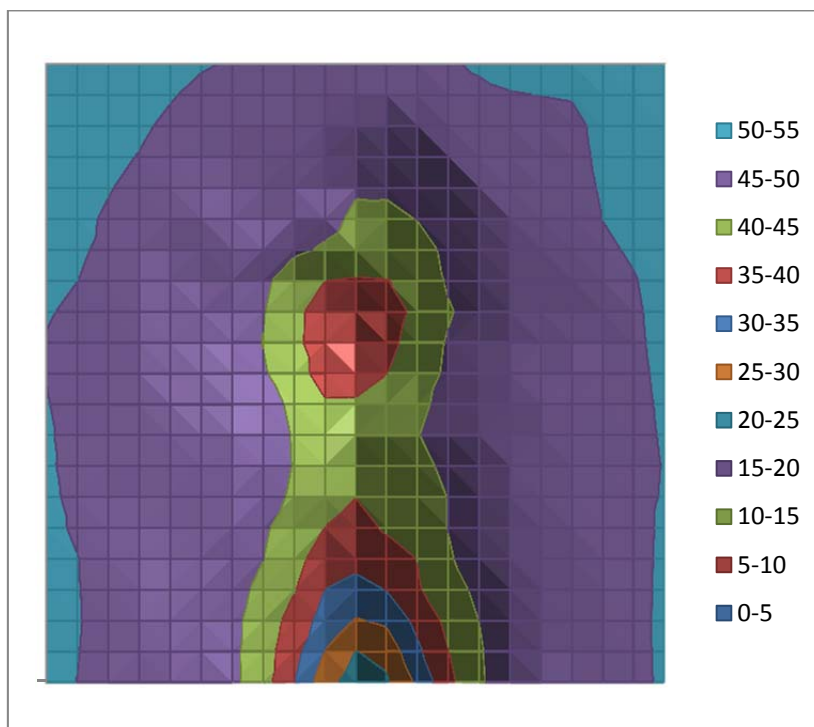


Figura 9.49.

A 2m

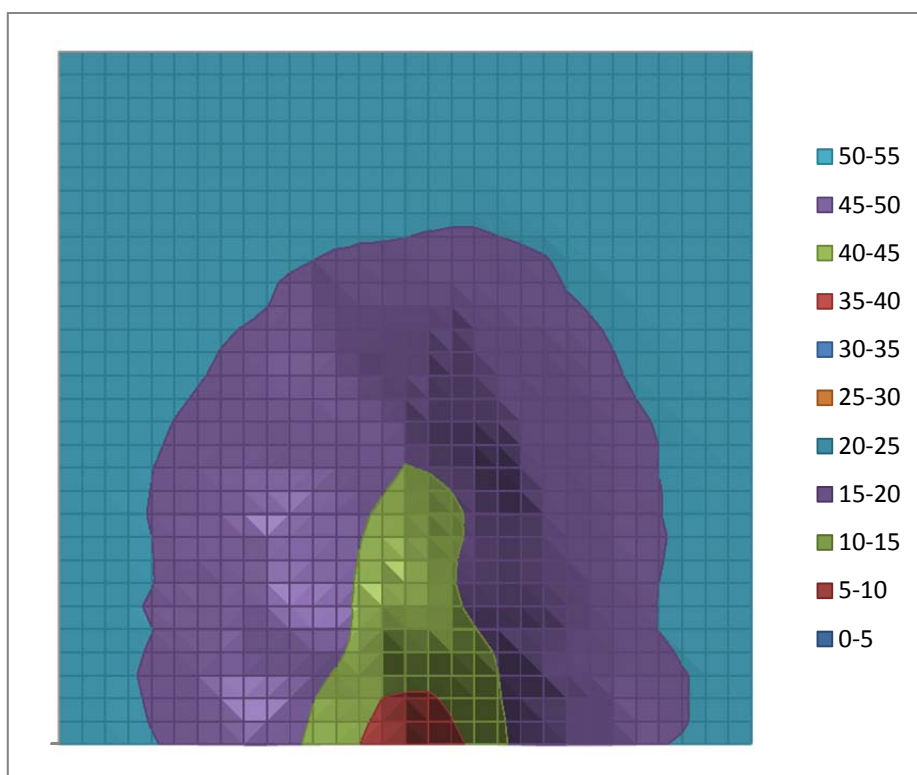


Figura 9.50.

A 5m

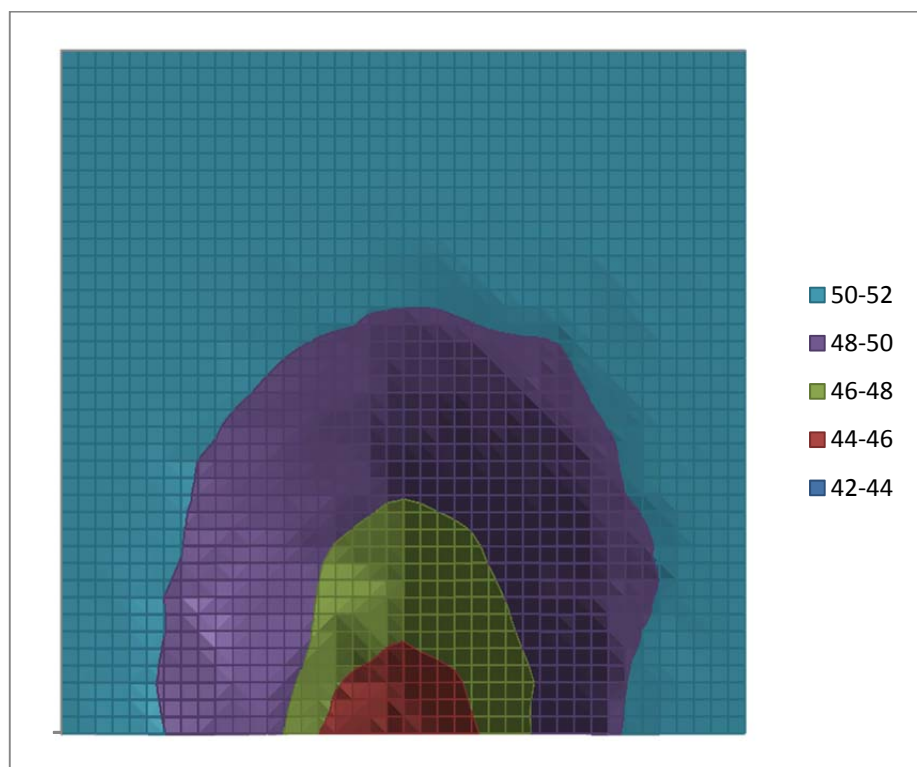


Figura 9.51.

A 0,5m

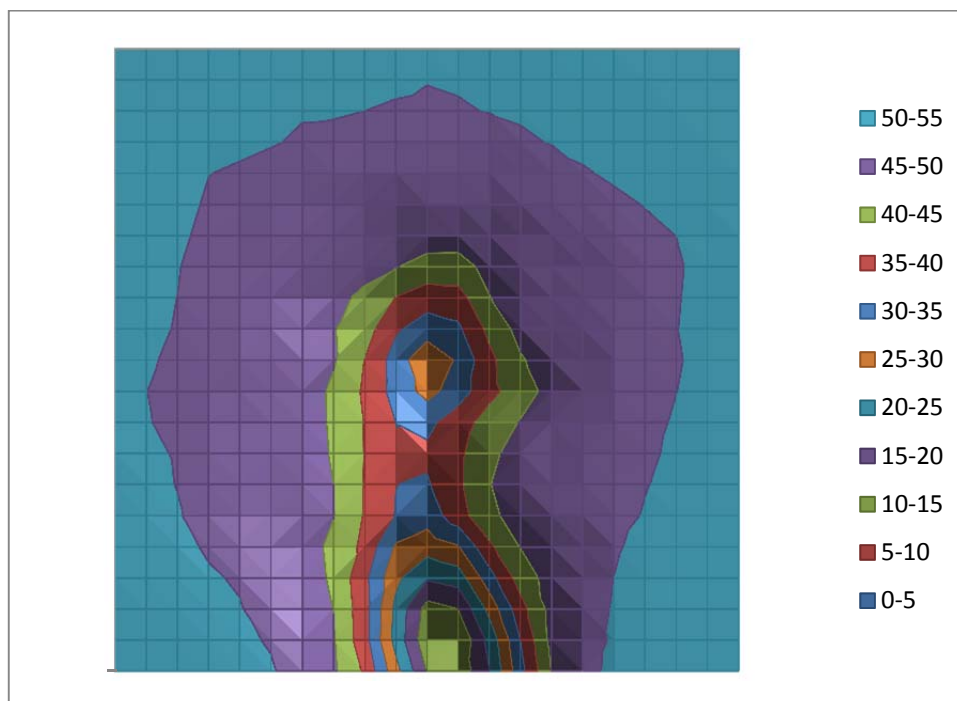


Figura 9.52.

A 1m

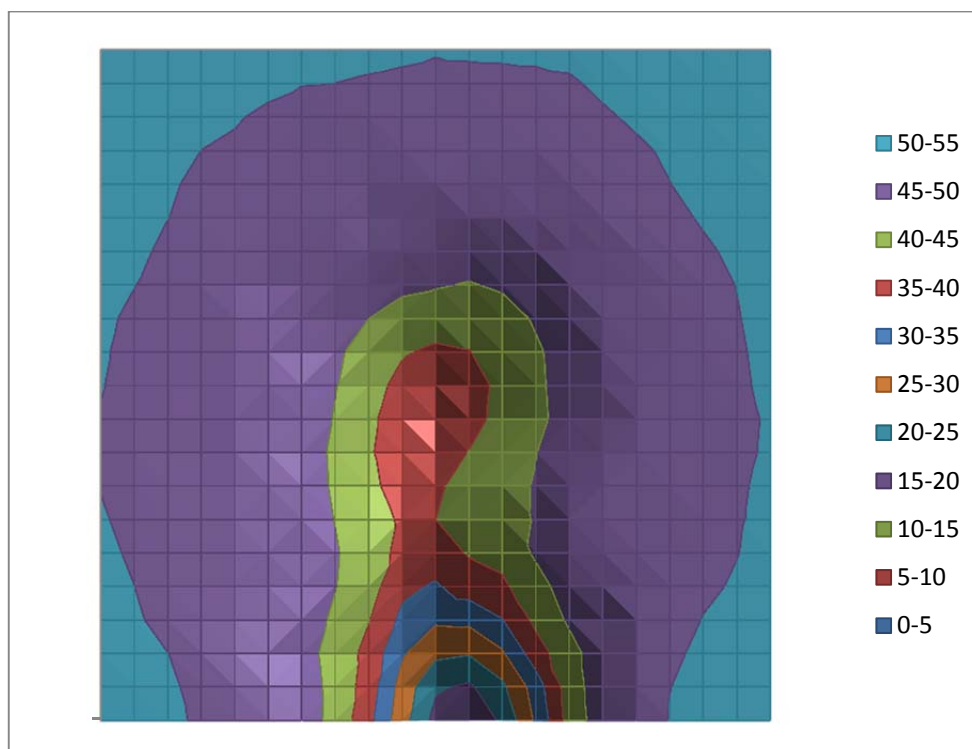


Figura 9.53.

A 2m

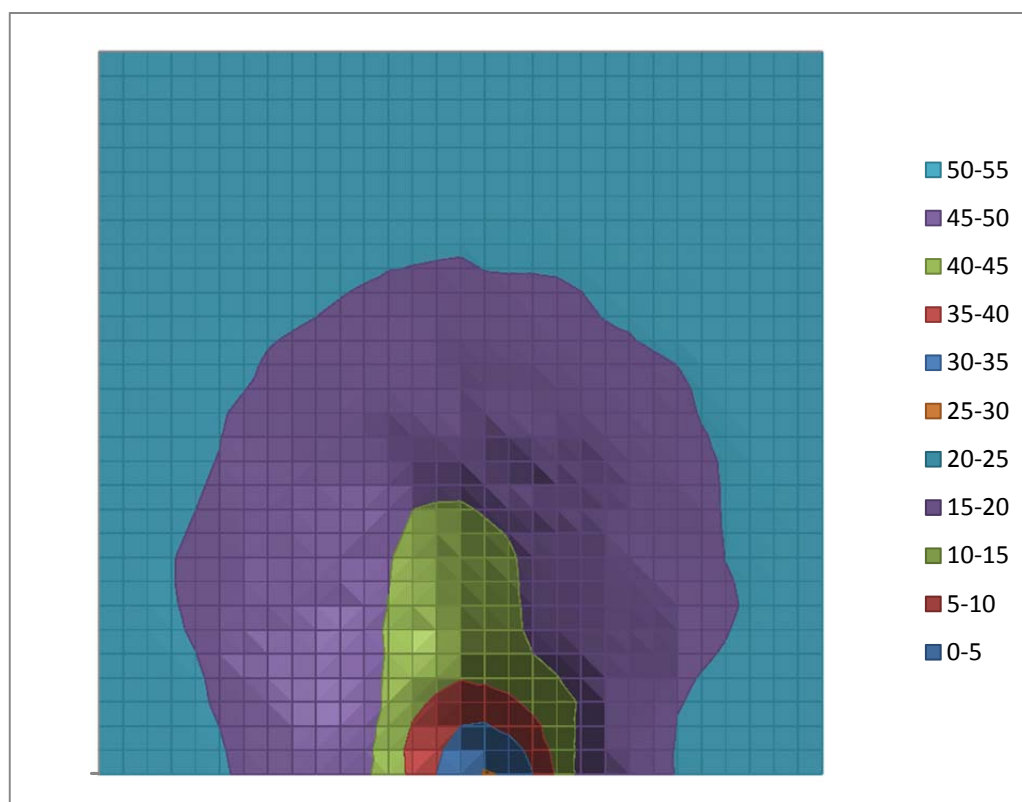


Figura 9.54.

A 5m

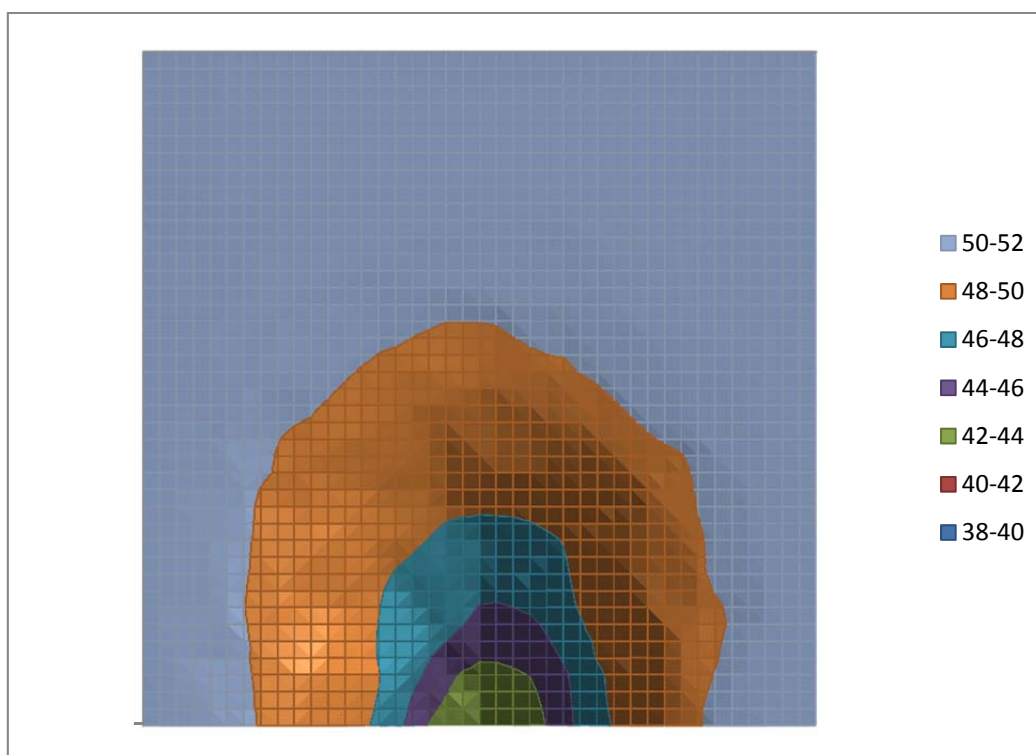


Figura 9.55.

Desviaciones Típicas

A continuación se van a mostrar las desviaciones típicas de las velocidades medias XY, XZ e YZ. Con ello se va a analizar la cantidad de fluido que poseen las estelas tras las motocicletas, y también ver en cuál de ellas hay una mayor desviación, es decir, cuál tiene más propensión de que se formen turbulencias.

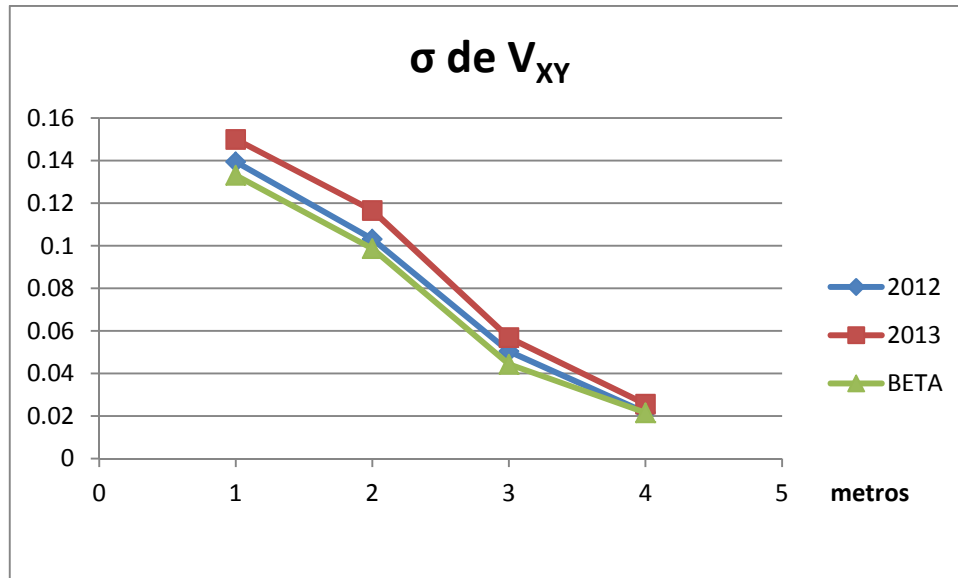


Figura 9.56: Desviación típica de las velocidades X e Y.

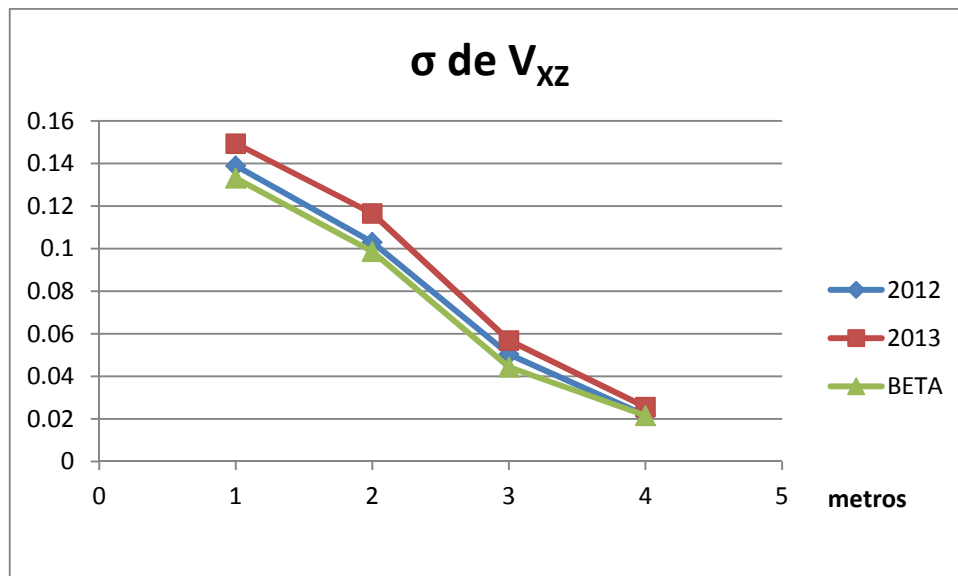


Figura 9.57: Desviación típica de las velocidades X y Z.

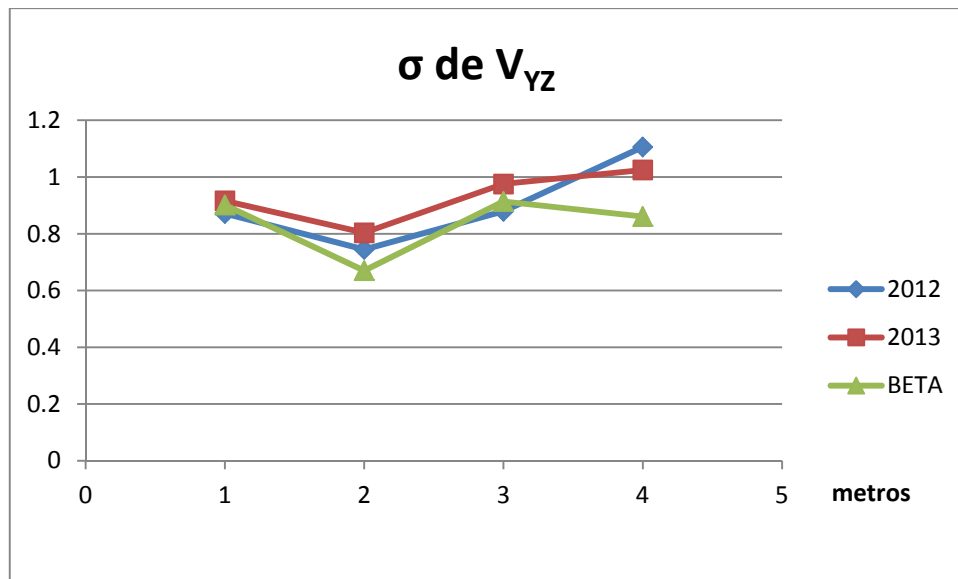


Figura 9.58: Desviación típica de las velocidades Y y Z.

Como se ha podido ver en las imágenes procedentes del punto 9.2.2, la estela que dejan tras de sí las tres motocicletas, se divide a su vez en dos pequeñas estelas. Estas estelas representan una depresión existente en la parte trasera de las motos y que, a medida que se van alejando, esta depresión se va desvaneciendo. Esto último se puede observar con un mayor detalle en los mapas gráficos que arriba se muestran.

Los mapas gráficos muestran aquellas zonas donde la depresión producida es mayor. Esta depresión está representada en función de una serie de valores, que según su valor el color mostrado será uno u otro. Cuanto más bajo sea el valor, más alta es la depresión que se genera en esa y viceversa.

En lo referente a la comparación de las diferentes estelas, primeramente se puede ver que las estelas que se forman tras el colín de las motos, la que tiene una mayor longitud y anchura es la del modelo BETA, aunque también hay que decir que no hay mucha diferencia con respecto al modelo Ariane 2013. Esta diferencia es más notable en la moto Ariane 2012.

Por otro lado, también se puede apreciar que la parte en la que se diferencian las estelas superior e inferior de las motocicletas, es más acusada en la Ariane 2012. Por el contrario en los otros dos modelos no es así.

En cuanto a las estelas en la parte inferior de las motocicletas, las que poseen un mayor parecido entre sí, son las de los modelos Ariane 2012 y BETA. Debido a su gran parecido en cuanto a forma, se puede observar con claridad que también hay un cierto parecido en esa en lo referente a la deceleración del aire y por tanto la depresión producida, siendo esta más acusada en la Ariane 2012. Sin embargo no ocurre lo mismo con el modelo Ariane 2013, cuya estela inferior es bastante más alargada y la deceleración del aire en esa zona no es tan acentuada.

Realizando una comparativa más general, a simple vista se puede observar la diferencia de longitud de estelas entre las tres motos. Siendo las más alargada la de la Ariane 2013. Esto viene a decir que el aire fluye mejor tras la moto ya que se canaliza mejor. Aunque la estela dejada es mayor no se crean tantos vórtices y por lo tanto el fluido mantiene más su estructura laminar en comparación con la de los otros dos modelos, siendo sus respectivas estelas más bastas, anchas y con una mayor depresión en la parte del depósito y parte inferior trasera, por lo que existen mayores perturbaciones.

Por último, según se puede observar en las gráficas que representan las desviaciones típicas, en los tres casos la curva más elevada es la perteneciente a la Ariane 2013. Esto por un lado quiere decir que esta moto es capaz de canalizar mayor cantidad de fluido, siendo un poco más grande su desviación con respecto a las otras dos. Por otro lado hay una mayor posibilidad de que se generen más cantidad de perturbaciones, pero viendo los resultados obtenidos, si estas se forman no serían mucho más grandes que las que se puedan formar en los otros dos modelos. Por lo que se puede concluir, de una forma más exacta y clara, que el modelo Ariane 2013 posee mejores prestaciones aerodinámicas.

9.3 Cálculos y Análisis de los resultados

El programa de CFD puede aportar una serie de resultados de forma directa, como por ejemplo las fuerzas ejercidas sobre las motos, o la mínima y máxima velocidad en el eje longitudinal de las mismas.

9.3.1 Resultados numéricos

Área frontal:

El área frontal o el área transversal del vehículo, es la superficie de proyección de esta sobre un plano transversal. Esta es la que afecta directamente a la resistencia aerodinámica, pero esto no quiere decir que si se tiene un área mayor el perfil aerodinámico sea peor.

Los valores de las secciones de las motos son las siguientes (no está incluido el piloto):

Ariane 2012= 0,44 m²

BETA= 0,47 m²

Ariane 2013= 0,48 m²

Como se puede ver, el área de la Ariane 2012 es la más pequeña y, tomando como referencia la BETA, el nuevo carenado de la Ariane 2013 es muy parecido en cuanto a tamaño e incluso siendo algo más grande.

9.3.2 Coeficiente de resistencia Aerodinámico

Como ya se ha comentado anteriormente, el coeficiente aerodinámico (C_D) es la expresión de la resistencia que ejerce un cuerpo dentro de un fluido por la razón de la forma que este posee. Es un coeficiente adimensional, y hasta cierto punto el C_d no depende de la forma del cuerpo ni de la velocidad.

Al C_D también se le llama coeficiente de penetración C_x , siendo X una dirección en un sistema de tres coordenadas; al coeficiente de sustentación o de elevación se le denomina C_z por la misma causa.

El coeficiente de resistencia tiene la nomenclatura C_d proveniente de la nomenclatura que se usa en el inglés: C= coeficient y D= drag. Esto mismo ocurre con el coeficiente de sustentación, que usando la nomenclatura proveniente del inglés z=l= lift.

Sabiendo que: $F = 1/2 \rho C_x A v^2$ (24)

Siendo: $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$

$V = 50 \text{ m/s}$

Ariane 2013	(1, 0, 0)	470,39502	12,610439	483,00546	767,99187	20,588472	788,58034
	(0, 1, 0)	-25,889429	0,098202035	-25,791227	-42,268456	0,1603299	-42,10813
	(0, 0, 1)	4,7214527	-1,8386134	2,8828393	7,7084942	-3,0018178	4,7066764
		Area(m^2)	0,477465		Cd	0,6606393	
BETA	(1, 0, 0)	479,7522	14,328718	494,08092	783,26889	23,393826	806,66272
	(0, 1, 0)	4,439353	-0,00410359	4,4352494	7,2479323	-0,0066997	7,2412235
	(0, 0, 1)	-66,969429	-1,4100605	-68,37949	-109,3379	-2,3021396	-111,64
		Area(m^2)	0,474285		Cd	0,680319	
Ariane 2012	(1, 0, 0)	452,51273	14,200336	466,71306	738,79629	23,184221	761,98051
	(0, 1, 0)	34,697826	0,061564449	34,759391	56,649512	0,1005134	56,750026
	(0, 0, 1)	-46,823051	-1,7162635	-48,539315	-76,445798	-2,8020633	-79,24786
		Area(m^2)	0,440162		Cd	0,6924546	

Figura 9.59.

La primera columna empezando por la izquierda indica el modelo de la moto, la segunda indica el vector, las dos siguientes muestran la presión y la viscosidad en Newtons, respectivamente. A continuación se muestra la suma de las columnas anteriores. Siguiendo con la explicación anterior, en la tabla se muestran los coeficientes de presión y de viscosidad con su correspondiente suma.

En lo referente a los cálculos mostrados, hay que resaltar que han sido hallados de forma teórica. Aunque por otro lado los datos que se ofrecen los programas de CFD se pueden aproximar bastante a los datos que se pueden hallar de forma experimental en los túneles de viento.

Un dato muy importante a tener en cuenta, es la supresión de los flujos internos y de los escapes, que aunque parezca no tener mucha relevancia, si la tiene porque aparte de permitir el flujo del aire por interior del vehículo, estas corrientes internas por un lado frenan el fluido generando turbulencias, por lo que se producen mayores pérdidas y por tanto se genera una mayor resistencia aerodinámica.

Un ejemplo muy claro que demuestra esta teoría, es lo que les ocurrió a los ingenieros del equipo navarro "Inmotec". Crearon una maqueta solida (sin huecos) del prototipo que correría el mundial, lo ensayaron en el túnel de viento y les dio unos resultados muy esperanzadores. Más adelante, al repetir la prueba con el prototipo real, los buenos resultados se redujeron debido a los flujos internos.

Por otro lado aunque se tenga en cuenta este tipo de factores, si el método de comparación es el mismo para todos los análisis de CFD realizados, se puede llegar a saber cuáles de todos los modelos estudiados es mejor.

En lo referente a los resultados que se muestran, como ya ha dicho en varias ocasiones, la moto que menor coeficiente de resistencia presenta es el modelo Ariane 2013, que en comparación con los otros dos modelos es bastante inferior por lo que la mejora de la carena del modelo 2012 al 2013 ha sido bastante significativa.

Sustentación:

En la realización del análisis, también es posible calcular la fuerza vertical que el aire sobre las motos cuando estas circulan, en el caso planteado, a unos 180 km/h.

Una sustentación negativa hace que la moto se adhiera mejor a la carretera, de esta manera se favorece el agarre y la estabilidad de esta. Por otro lado también aparecer una sustentación positiva, por lo que puede suceder lo contrario a lo mencionado anteriormente.

En el caso de la Ariane 2013, aparece una sustentación positiva en el eje Z de 0,5 kg, pero como es una fuerza pequeña y siendo el caso de una moto, no tiene relevancia. Esto no sería así en el caso de un coche, en los cuales sí que se busca que haya una fuerza negativa en el eje Z para obtener un mayor agarre y tener así un mejor paso por curva. Un ejemplo claro de esto son los coches de la Fórmula 1.

Es importante saber que si se tiene una fuerza de sustentación positiva, puede tener una serie de ventajas:

- Menor resistencia de rodadura a altas velocidades.
- Mayor velocidad punta.
- Mayor aceleración a altas velocidades.
- Menor resistencia al avance.

Por otro lado también hay que tener en cuenta que la aparición de fuerzas en los ejes verticales, pueden traducirse en pérdidas de fuerza en los ejes longitudinales.

9.3.3 Fuerza de resistencia al avance

Este apartado se afronta de manera teórica, ya que por un lado los programas utilizados no dan esta opción de cálculo como otros programas más modernos como puede ser el Star ccm+, y por otro lado este factor es muy importante a tener en cuenta.

En las fuerzas de resistencia al avance del vehículo influyen principalmente tres factores:

- La resistencia aerodinámica.
- La resistencia de rodadura de los neumáticos.
- La pendiente de la calzada.

La **resistencia de rodadura** de los neumáticos, es la resistencia debida a la deformación de estos al efectuar el giro.

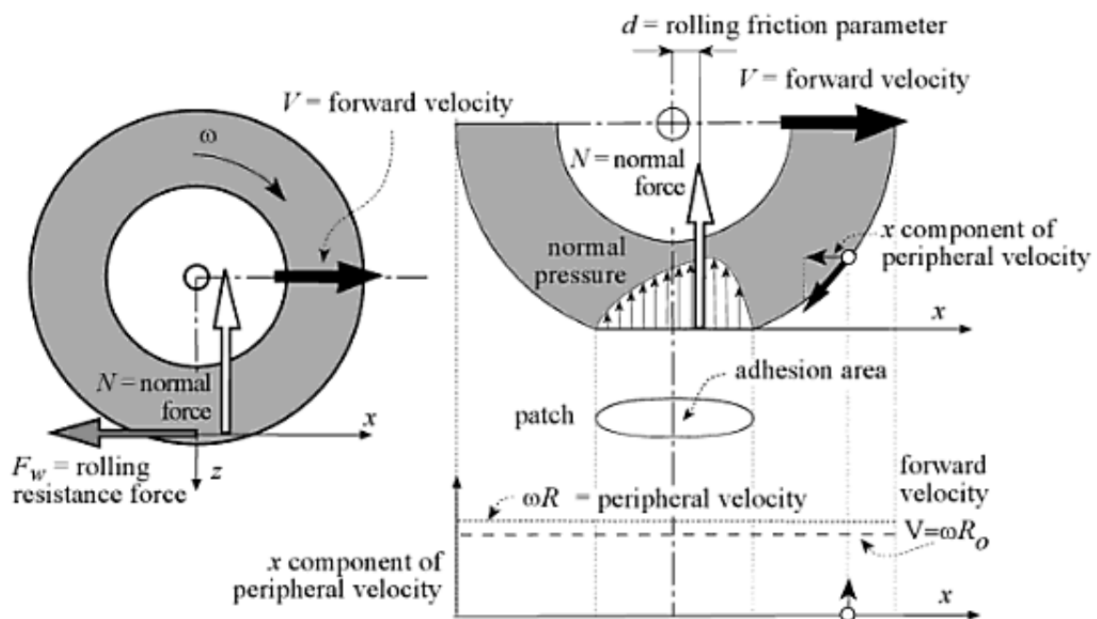


Figura 9.60.

El valor de esta fuerza opositora se obtiene a partir del producto de la carga en la rueda y el coeficiente de resistencia a la rodadura f_w :

$$F_w = f_w \cdot N \quad (25)$$

El valor de f_w varía en función del tipo de neumático, sus dimensiones, sus características y la temperatura. Pero principalmente este coeficiente se ve condicionado por la velocidad lineal y la presión en el neumático. Para calcular este parámetro Kevin Cooper propone las siguientes formulas empíricas donde solo se tienen en cuenta las variables de presión de inflado (bar) y velocidad (km/h):

$$f_w = 0.0085 + \frac{0.018}{p} + \frac{1.59 \cdot 10^{-6}}{p} V^2 \quad \text{para velocidades inferiores a 165 km/h} \quad (26)$$

$$f_w = \frac{0.018}{p} + \frac{2.91 \cdot 10^{-6}}{p} V^2 \quad \text{para velocidades superiores a 165 km/h} \quad (27)$$

Las cargas de los neumáticos se calculan sumando la carga estática con la transferencia de carga:

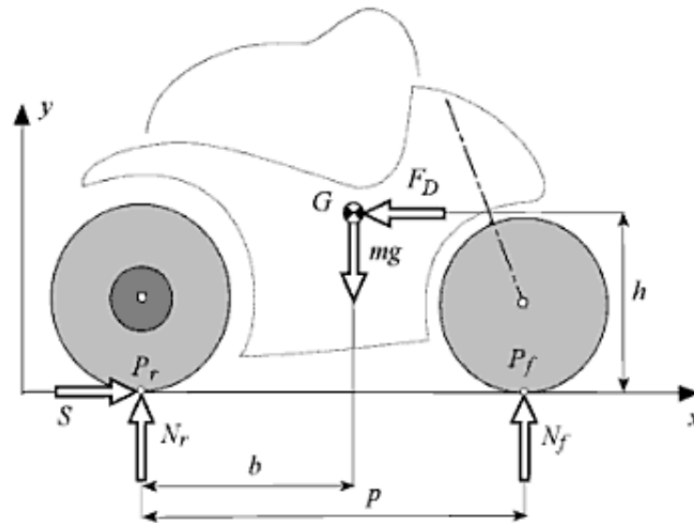


Figura 9.61.

Si hacemos un equilibrio de todas las fuerzas y momentos de la figura obtenemos las cargas dinámicas de los neumáticos:

$$N_f = mg \frac{b}{p} - S \frac{h}{p} \quad \text{Rueda delantera} \quad (28)$$

$$N_r = mg \frac{(p-b)}{p} + S \frac{h}{p} \quad \text{Rueda trasera} \quad (29)$$

Considerando $S = F_D$ = fuerza de resistencia aerodinámica.

10.Conclusiones

Tras haber realizado un exhaustivo estudio y análisis aerodinámico, se han podido obtener una serie de conclusiones que se deben tener en consideración a la hora de realizar modificaciones en modelo de la Ariane 2013, para crear el nuevo modelo 2013 teniendo como moto de referencia un modelo de motocicleta BETA.

Después de haber realizado un previo aprendizaje de los programas a utilizar, se hizo un pequeño estudio inicial del procesado de las geometrías y de las posibles vías de trabajo, teniendo en cuenta las personas implicadas en el proyecto, así como la estimación de los plazos. Por lo que en un principio se decidió por optar un planteamiento de trabajo que consistía en trabajar con las mitades de las motos para luego hacer una simetría que, en un principio ahorraría mucho tiempo y trabajo.

Una vez adquiridos todos los datos de partida y los archivos para poder trabajar, se empezó a desarrollar el método sugerido desde un principio. Como ya se ha dicho con anterioridad se realizó la limpieza y simplificación de las diferentes piezas de las motocicletas para después proceder a su posterior unión. Una vez que se consiguió un primer modelo con este primer método, a la hora de mallar surgieron una serie de problemas debido a la simetría que se planteó hacer, el problema fue que al realizar esta simetría, las piezas en esa zona no estaban unidas, por lo que se tuvo que descartar ese método de trabajo.

Se planteó un nuevo método de trabajo, evitando este método de simetría, que analizado con más profundidad fue más fiable, pero por otro lado también hubo que invertir más tiempo para el procesado de las diferentes piezas. El lado bueno de este nuevo método empleado fue que como la única diferencia entre las motos era la carena, las otras piezas, que una vez listas se podían usar tantas veces como se quisiera.

De las tres motos tratadas, la que más problemas dio a la hora de preparar las geometrías, fue el modelo BETA, debido a la forma en que se recibieron los archivos(o piezas), mientras que las piezas de las otras motos fueron creadas con programas CAD, para conseguir las geometrías de la BETA se recurrió al método del escaneo tridimensional, que a la hora de introducir los datos del archivo en el software, este daba una serie de errores más un importante consumo de memoria que en muchas ocasiones ha impedido el desarrollo del trabajo previsto.

Una vez conseguidos los tres modelos geométricos, antes de poder trabajar en Fluent se tuvo que recurrir a un tercer programa llamado TGrid, para poder crear los mallados volumétricos que necesitaba el Fluent para poder trabajar. Ya que al intentar crear los volúmenes de los modelos, debido a su complejidad el software no era capaz de crearlos.

Una superadas todas las dificultades que fueron surgiendo, se empezó con el correspondiente estudio comparativo. Para poder ver cuál de los tres modelos era mejor, se recurrió al análisis mediante simulación de elementos finitos, o mejor dicho, a la dinámica de

fluidos computacional (CFD). Siendo este uno de los métodos más accesible y asequible para nuestros equipos, ya que al ser softwares comerciales no se requieren tener equipos muy potentes.

Al ser estos software de ámbito ingenieril, se pudieron obtener una gran cantidad de datos en relativamente poco tiempo, y siendo estos bastante fiables como los que se podrían obtener, por ejemplo en ensayos de túnel de viento.

De los tres modelos que se analizaron, el modelo Ariane 2013 es la que mejores resultados aporta de forma general en lo referente a prestaciones de tipo aerodinámico, frente a las que portan los otros modelos. Era evidente que la que perores resultados iba a tener era el modelo Ariane 2012, modelo que desde un principio se quería mejorar tomando como referencia el modelo BETA.

Aunque la diferencia de prestaciones que ofrecen los modelos de Ariane 2013 y BETA son muy parecidos, se pueden ver diferencias significativas en cuanto a las fuerzas aplicadas sobre estos dos modelos. En primer lugar se puede observar que sobre la Ariane hay una pequeña fuerza de sustentación de unos 0,5 kg que no es significativa desde el punto de vista que se está llevando a cabo. Por el contrario la BETA se puede observar que hay una fuerza de sustentación negativa por lo que esta tendrá mucha estabilidad longitudinal y también mucho agarre, pero esto también tiene sus consecuencias negativas como menos aceleración en recta o más degradación de los neumáticos, caso contrario que ocurre con la Ariane. De todo esto, viendo que la sustentación creada por la Ariane no es significativa, se puede ver que con respecto a la BETA, la Ariane va a tener una mayor velocidad punta y mayor aceleración, criterios con mucha relevancia.

Hay que recordar que las geometrías empleadas en las simulaciones son un modelo aproximado de la realidad, ya que son modelos virtuales dibujados en tres dimensiones adaptados a los requisitos del análisis y a las limitaciones de software. La diferencia más notoria es la ausencia de flujos internos. Los resultados se ven afectados en la resistencia al avance y en la sustentación, pero muy probablemente afecten a los dos carenados por igual, así que la comparación sigue siendo totalmente válida.

Por otro lado, hay que resaltar que una vez obtenidos los datos aportados por el software Fluent, son una serie de datos teóricos y orientativos, que para su posterior análisis se ha tenido que recurrir a la búsqueda de otros trabajos realizados con CFD para poder interpretarlos correctamente, y así poder establecer una serie de comparaciones entre los tres modelos y ver sus ventajas y desventajas entre ellos. Como ya se ha dicho, al ser estos datos orientativos, si realmente se quisiera obtener una serie de datos reales, se tendría que tener en cuenta que sobre la moto hay un piloto, que no se ha incluido por problemas de geometría y tiempo, y además habría realizar una serie de test, ya sea en túneles de viento o realizar tests en circuitos.

Finalmente, la conclusión de más relevancia de este proyecto es el cumplimiento del objetivo establecido, el cual era conseguir una mejora del rendimiento aerodinámico del modelo Ariane 2012, para poder crear un nuevo modelo para la temporada 2013.

Aunque sólo hubo tiempo para poder crear una carena nueva, el objetivo inicial fue también hacer modificaciones en la quilla y colín, y así haber podido crear un nuevo paquete completo de piezas para que las mejoras aerodinámicas hubieran sido más acentuadas.

Toda la información obtenida de los tres modelos servirá como una buena base de referencia a la hora de abordar futuros proyectos en lo que se quieran realizar nuevas mejoras de tipo aerodinámico. Además de que como ya se parte de una base, tanto las modificaciones como la obtención de los datos serán más eficientes.

11. Bibliografía

Libros:

Aerodinámica y Mecánica de Vuelo – Tomo I (Mecánica de Fluidos) – Prof. A. Barcala Herreros – EUITA

Motocicletas: comportamiento dinámico y diseño de chasis: el arte y la ciencia – Tony Foale

Páginas Web

http://books.google.es/books?id=ST5hfaUMx0YC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

<http://www.aperiotec.es>

http://www.motorhead.es/img/Historia_del_carenado.pdf

http://www.mototuneusa.com/aerodinamica_dinamica_!.html

<http://ich1102g16.blogspot.com.es/2007/05/aerodinmica-en-motos.html>

<http://link.brightcove.com/services/player/bcpid711883929?bctid=979039175>

<http://foros.hondaclub.com.ar/threads/63727-Aerodin%E1mica-En-La-Motocicleta>

<http://www.toyota-motorsport.com/en/services-en/wind-tunnel-support-services-en/computational-fluid-dynamics-en>

<http://www.youtube.com/watch?v=YvE7IfmqTTg>

<http://www.youtube.com/watch?v=4WZ8qpH4tql>

<http://www.youtube.com/watch?feature=endscreen&v=P8VcZzgdfSc&NR=1>

<http://dukemotorsports.blogspot.com.es/2011/10/cfd-results-half-car.html>

http://www.beta-cae.gr/pdf/wrdigital_testimonial_long.pdf

http://www.aprperformance.com/index.php?option=com_content&task=view&id=17

2

<http://www.totalsim.us/team>

www.cavendishcfd.com

ANEXOS

Anexo I. Resultados con Piloto

Una vez finalizado el estudio de los modelos sin piloto, se procedió a crear los modelos con piloto de las dos Ariane2. Esto se hizo con la intención de obtener unos resultados más completos sobre las reacciones aerodinámicas del nuevo carenado.

Los métodos usados en esta comparativa son los mismos que en el caso anterior.

Comparación Aerodinámica de las motocicletas Ariane2 2012 y Ariane2 2013 de la fábrica ArianeTech

Por los resultados numéricos

	Vector	Pressure force (N)	Viscous force (N)	Total Force (N)	Pressure coefficient	Viscous coefficient	Total coefficient
2013	1 0 0	470,39502	12,610439	483,00546	767,99187	20,588472	788,58034
	0 1 0	-25,889429	0,098202035	-25,791227	-42,268456	0,16032985	-42,108126
	0 0 1	4,7214527	-1,8386134	2,8828393	7,7084942	-3,0018178	4,7066764
		Area(m^2)	0,477465		Cd	0,660639287	
FTR	1 0 0	479,7522	14,328718	494,08092	783,26889	23,393826	806,66272
	0 1 0	4,439353	-0,004103591	4,4352494	7,2479323	-0,006699742	7,2412235
	0 0 1	-66,969429	-1,4100605	-68,37949	-109,3379	-2,3021396	-111,63998
		Area(m^2)	0,474285		Cd	0,680318987	
2012	1 0 0	452,51273	14,200336	466,71306	738,79629	23,184221	761,98051
	0 1 0	34,697826	0,061564449	34,759391	56,649512	0,10051339	56,750026
	0 0 1	-46,823051	-1,7162635	-48,539315	-76,445798	-2,8020633	-79,247862
		Area(m^2)	0,440162		Cd	0,692454602	

	Vector	Pressure force (N)	Viscous force (N)	Total Force (N)	Pressure coefficient	Viscous coefficient	Total coefficient
2013 con Piloto	1 0 0	468,73584	18,073217	486,80906	765,283	29,507294	794,7903
	0 1 0	-63,393818	-0,14604814	-63,539866	-103,50011	-0,23844595	-103,73856
	0 0 1	72,661018	-3,1938603	69,467158	118,63023	-5,2144658	113,41577
		Area(m^2)	0,565929451		Cd	0,56175928	
2012 con Piloto	1 0 0	465,89615	19,416437	485,31259	760,64677	31,700306	792,34708
	0 1 0	30,191303	0,052360307	30,243664	49,291924	0,085486216	49,37741
	0 0 1	74,613625	-3,1865406	71,427084	121,81816	-5,2025153	116,61565
		Area(m^2)	0,553006793		Cd	0,573119242	

Figura Anexo I.1.

A simple vista podemos ver una mejora de un 2% entre el coeficiente de resistencia de la Ariane 2013 con respecto a la 2012. A parte de esto, podemos ver que el piloto se acopla mucho mejor a la moto del año 2013, ya que la diferencia de fuerzas longitudinales es mucho menor que en la 2012. En la 2013 pasa de una fuerza total longitudinal de 483 Newton a 486,8 Newton, mientras que la 2012 pasa de tener 466,7 Newtons de fuerza longitudinal a tener 485,3 N.

Por comparación de Estelas

A 0,5 metros

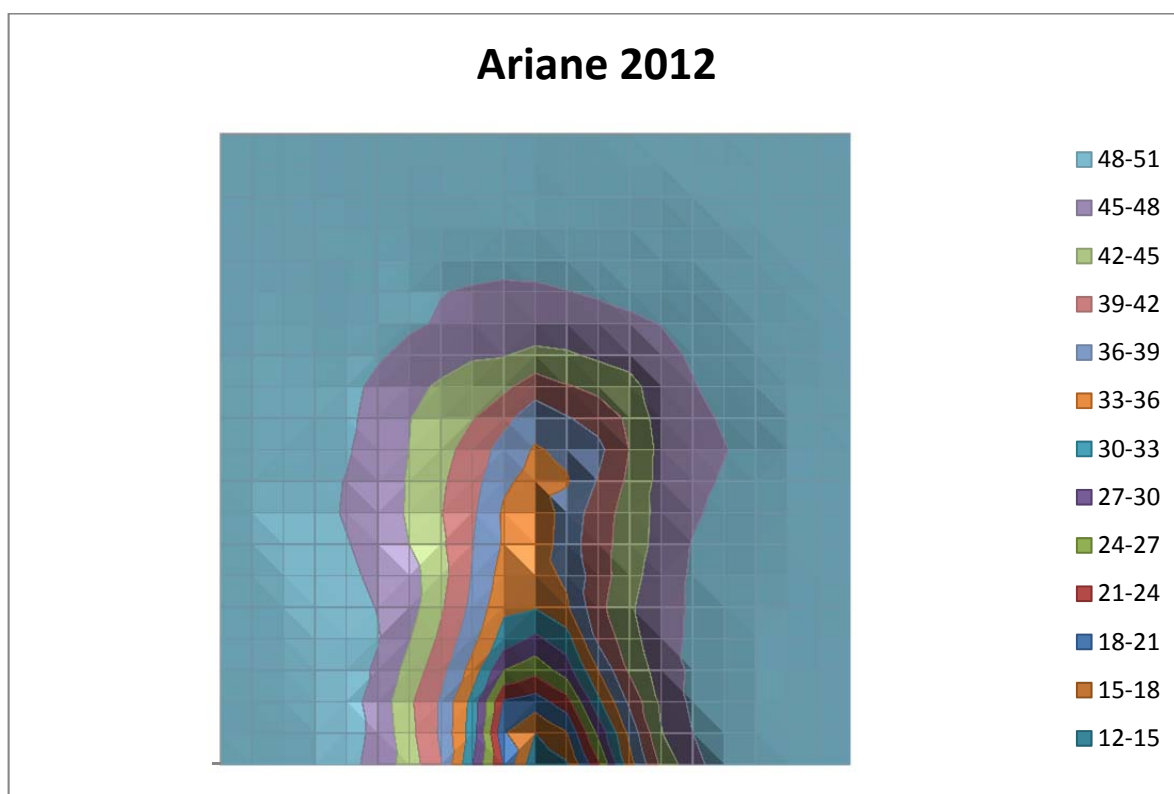
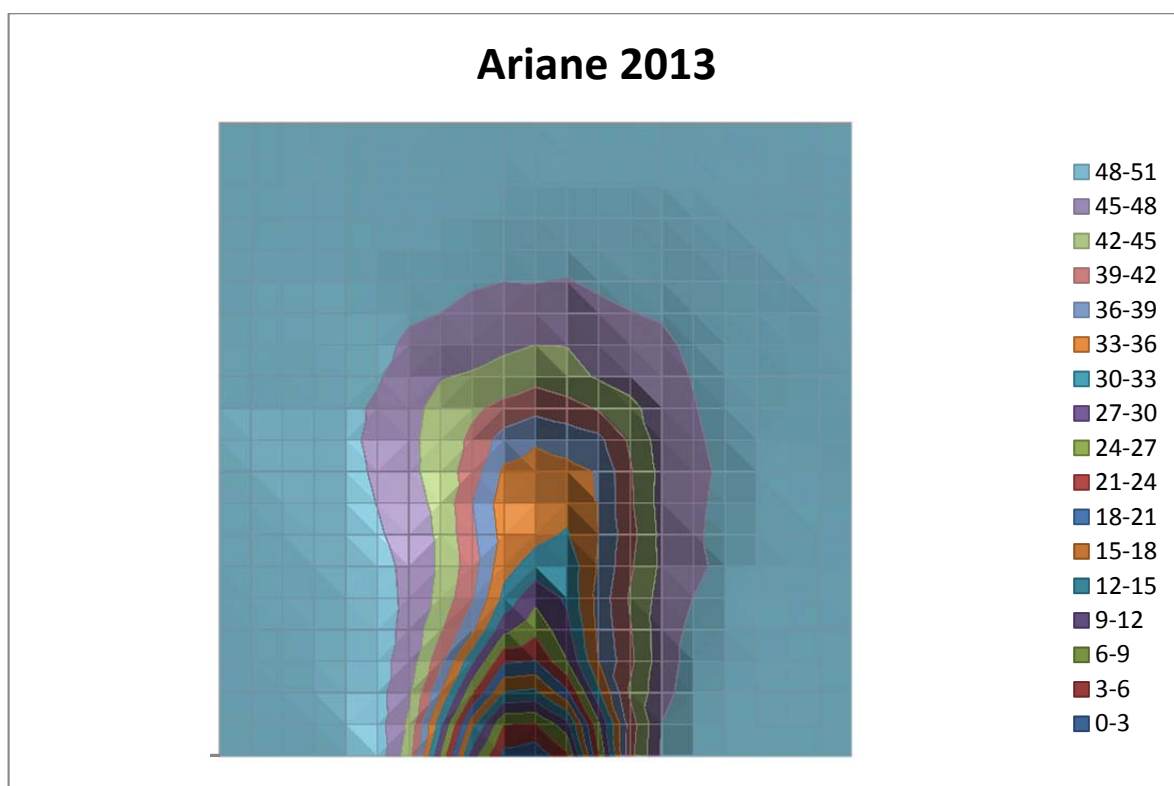


Figura Anexo I.2.

A medio metro podemos ver que aunque las estelas tienen una altura bastante parecida, la de la 2012 es más ancha y por lo tanto tiene una mayor área que la de la 2013.

A 1 metro

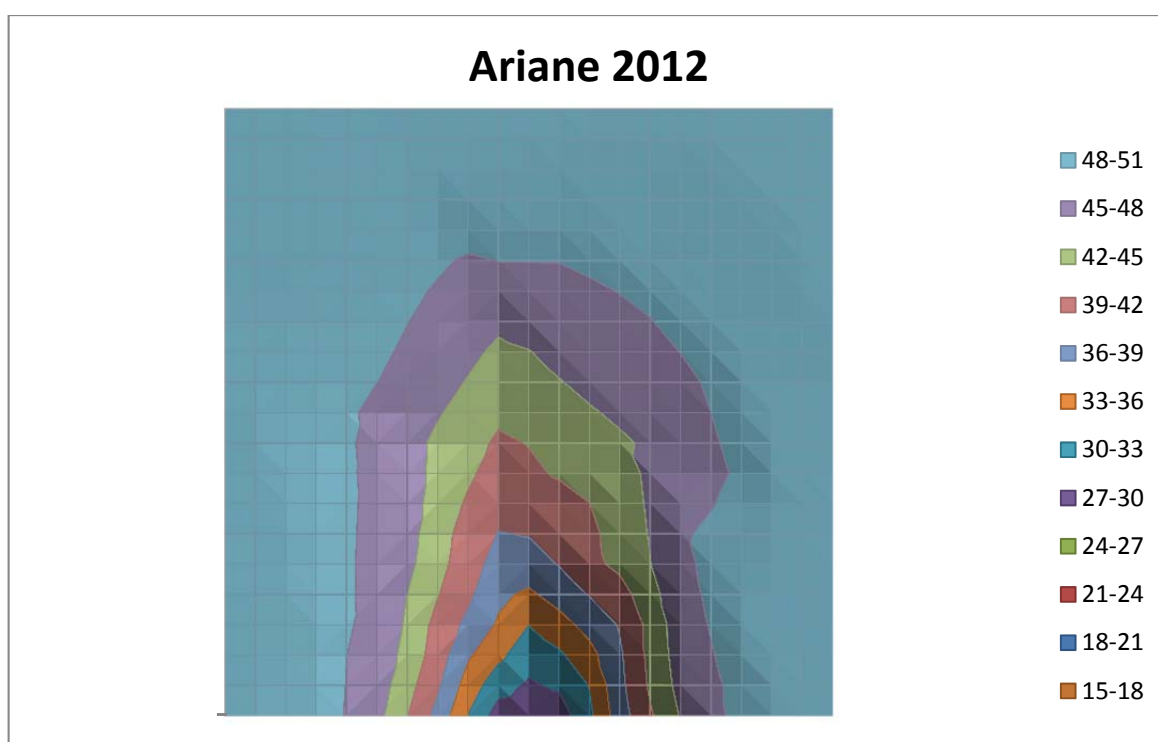
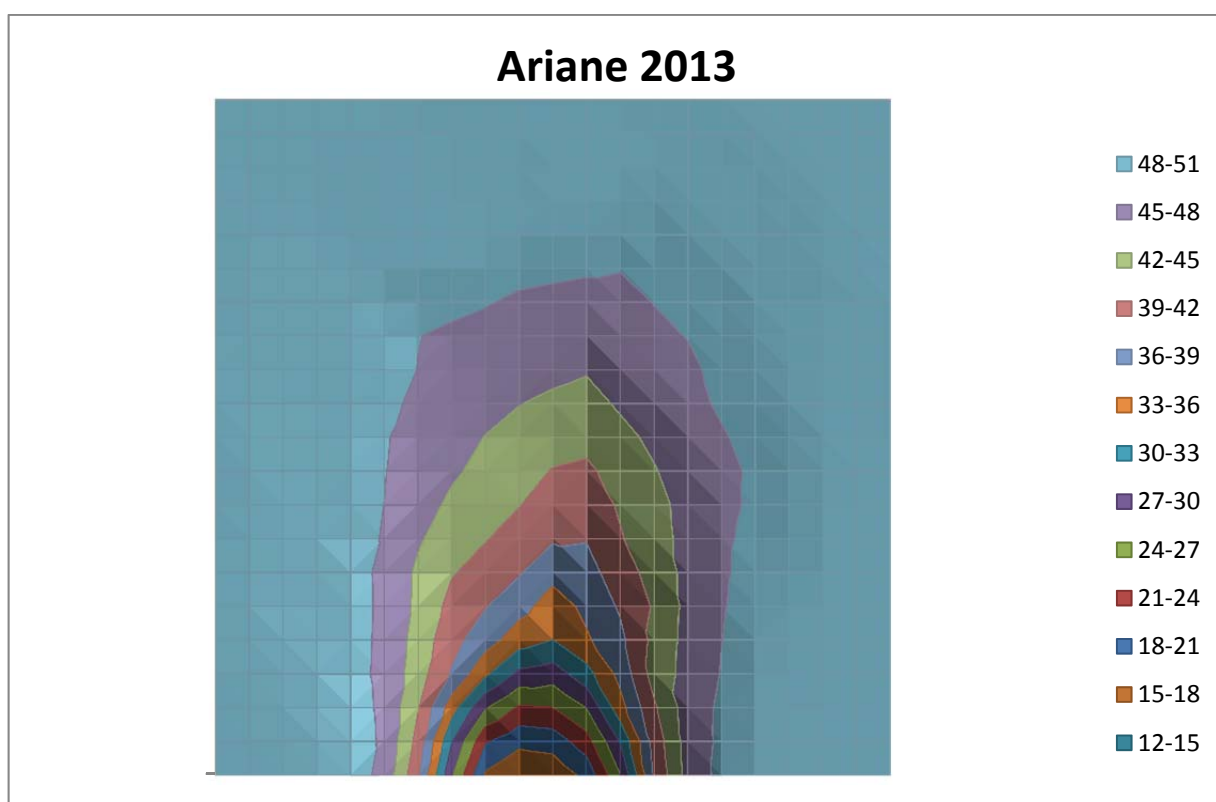


Figura Anexo I.3.

A 1 metro vemos lo mismo que a 0,5 metros pero de forma más clara ya que a 1 metro se sigue viendo que la 2013 se mantiene esbelta mientras que la estela de la 2012 no sólo es más ancha sino que también es más irregular.

A 2 metros

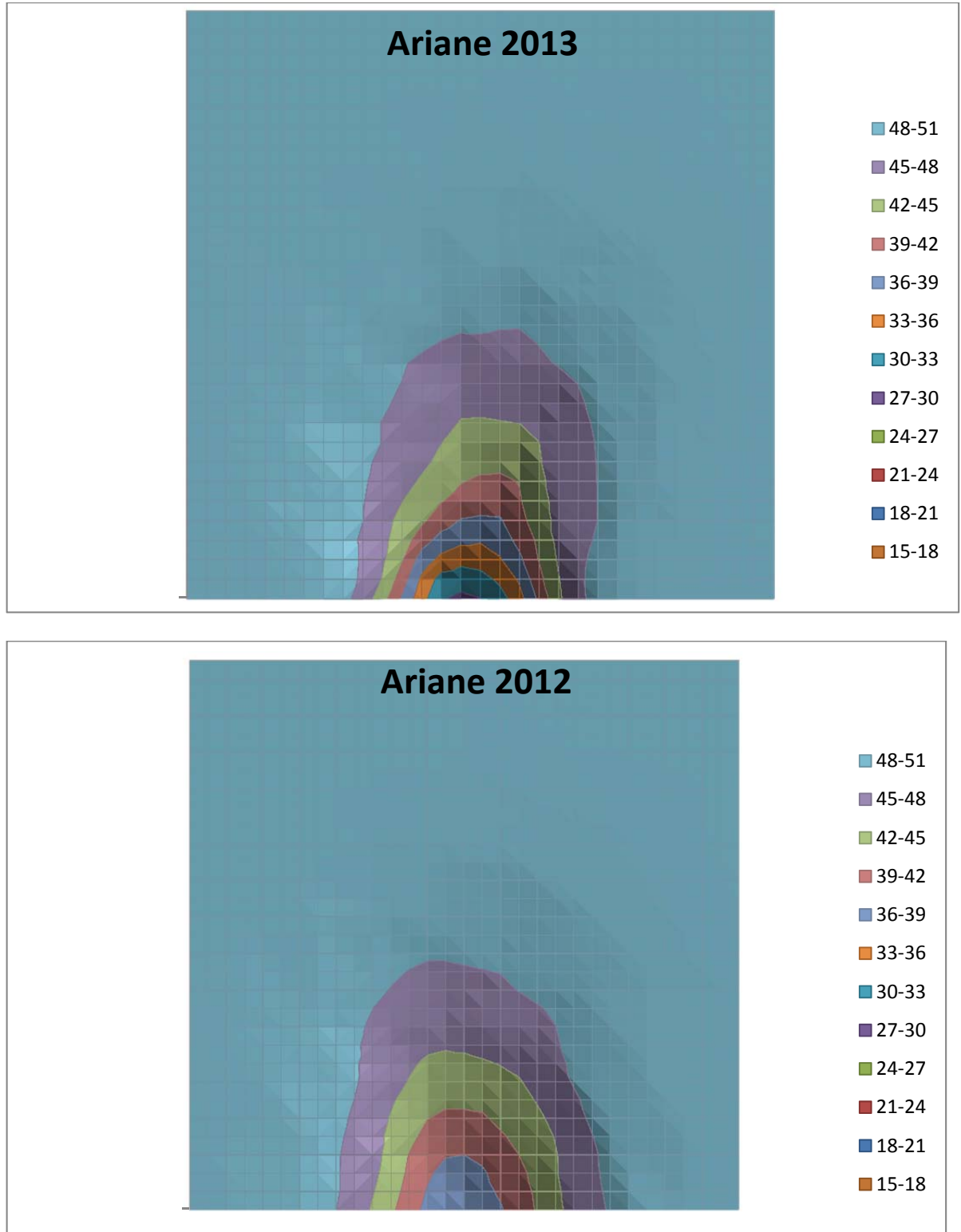


Figura Anexo I.4.

A 5 metros

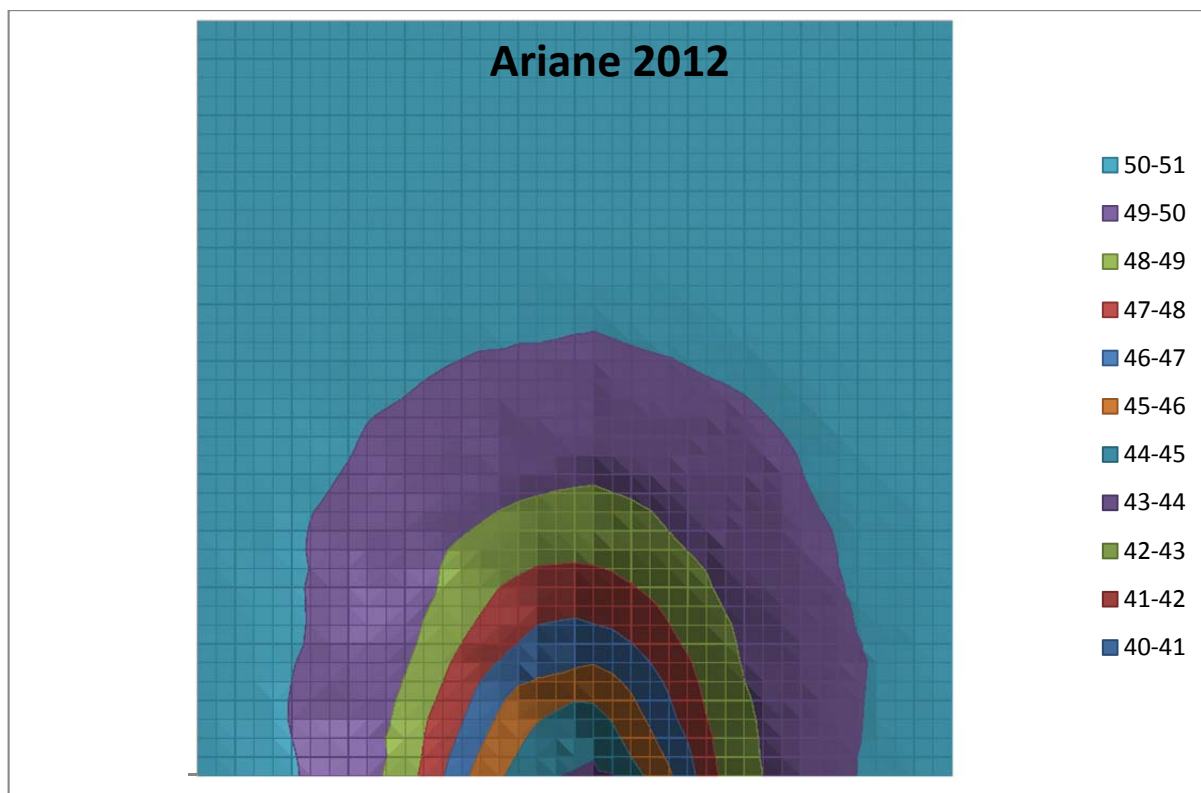
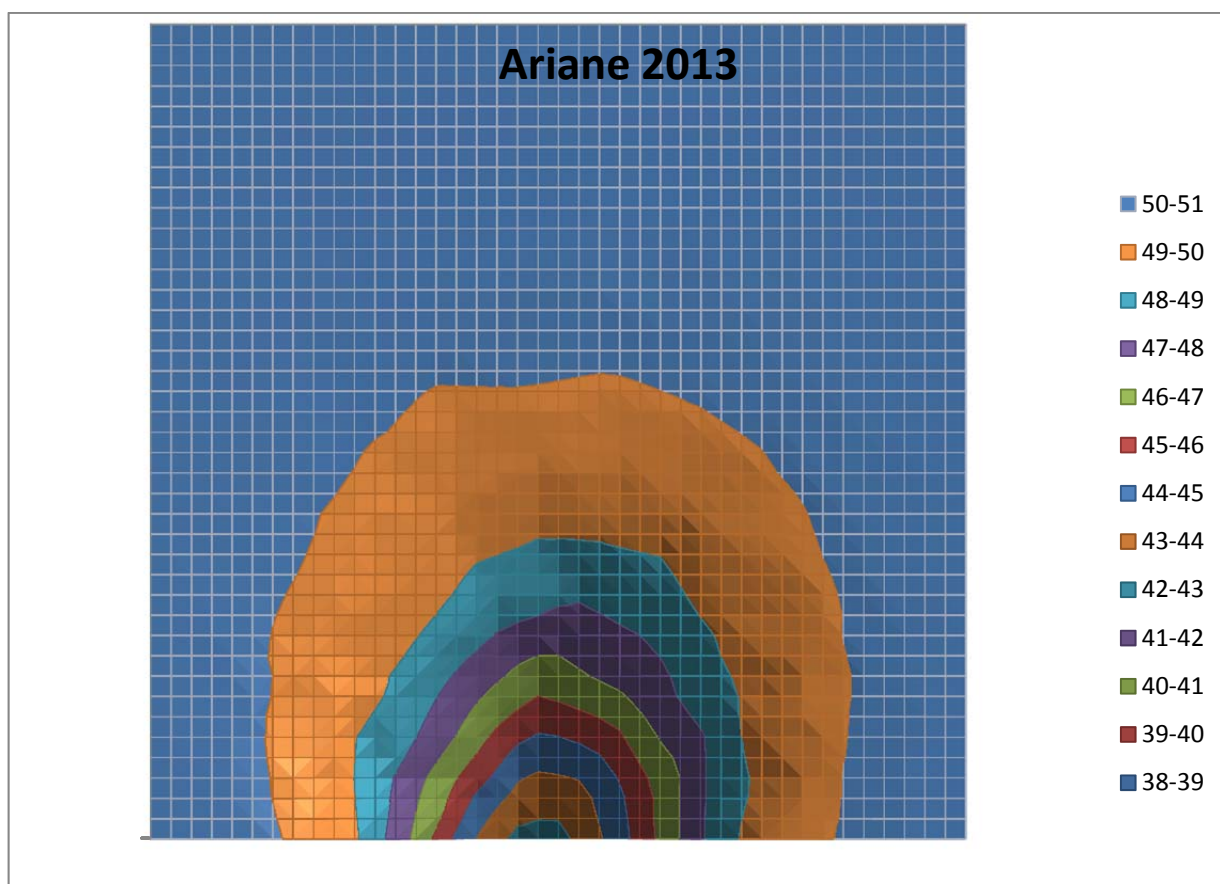


Figura Anexo I.5.

Al igual que en las otras dos distancias, a 2 y 5 metros de distancia las dos estelas siguen teniendo más o menos la misma altura, pero la estela de la 2012 sigue siendo más ancha que la de la 2013.

Vista longitudinal Ariane 2013

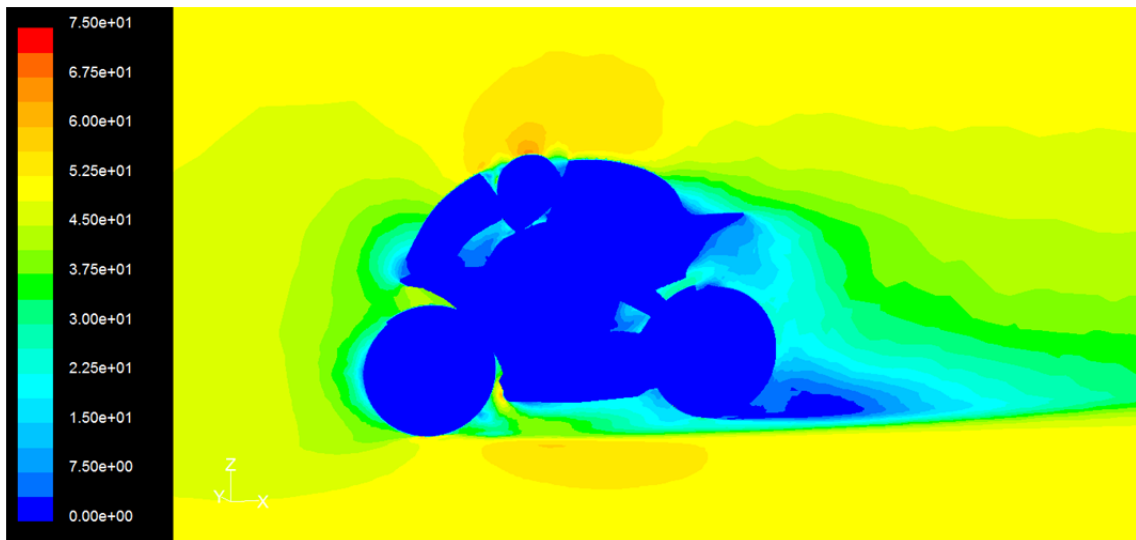
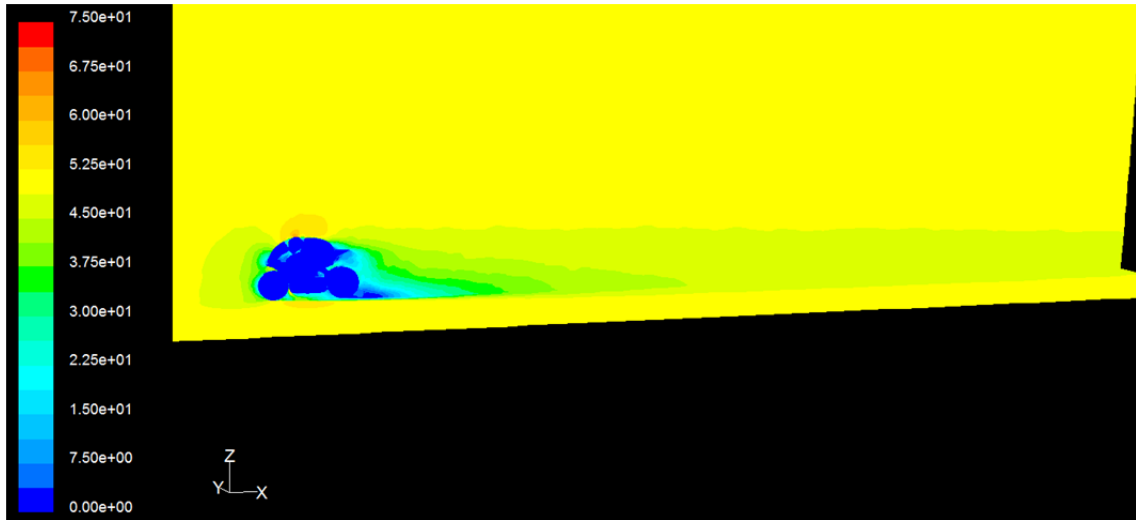


Figura Anexo I.6.

Vista longitudinal Ariane 2012

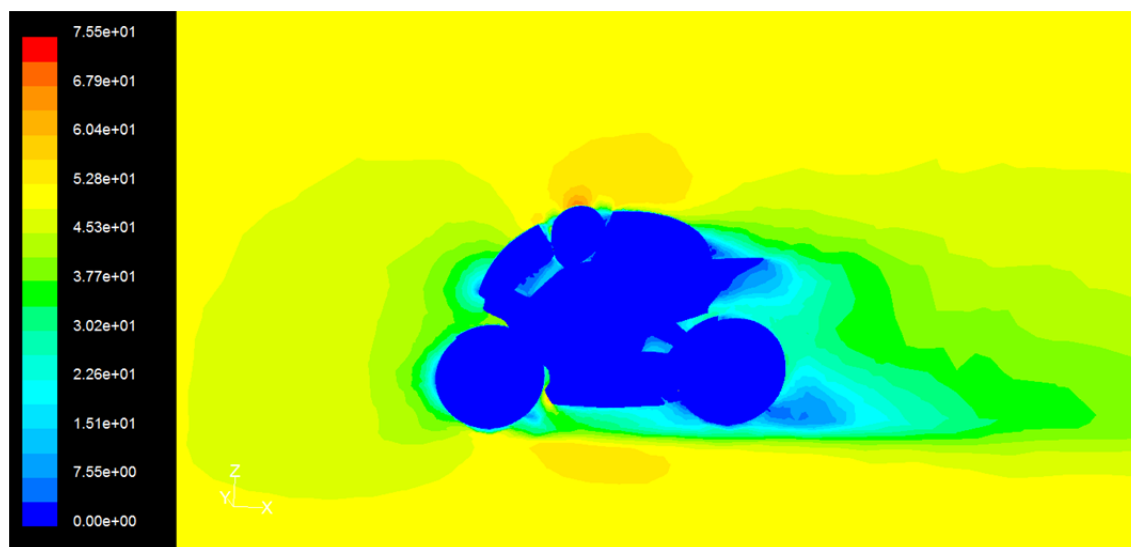
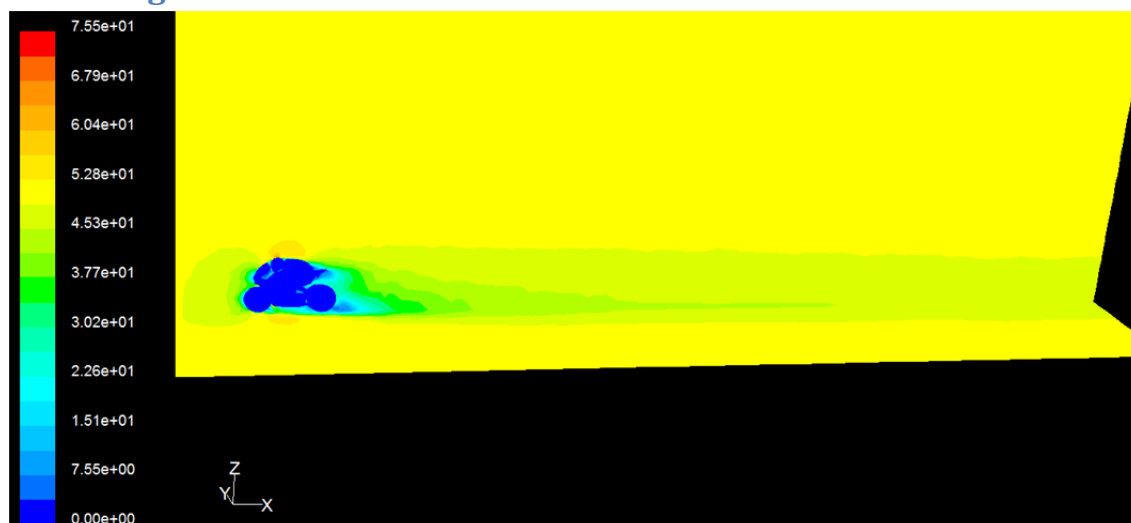


Figura Anexo I.7.

Vista superior Ariane 2013

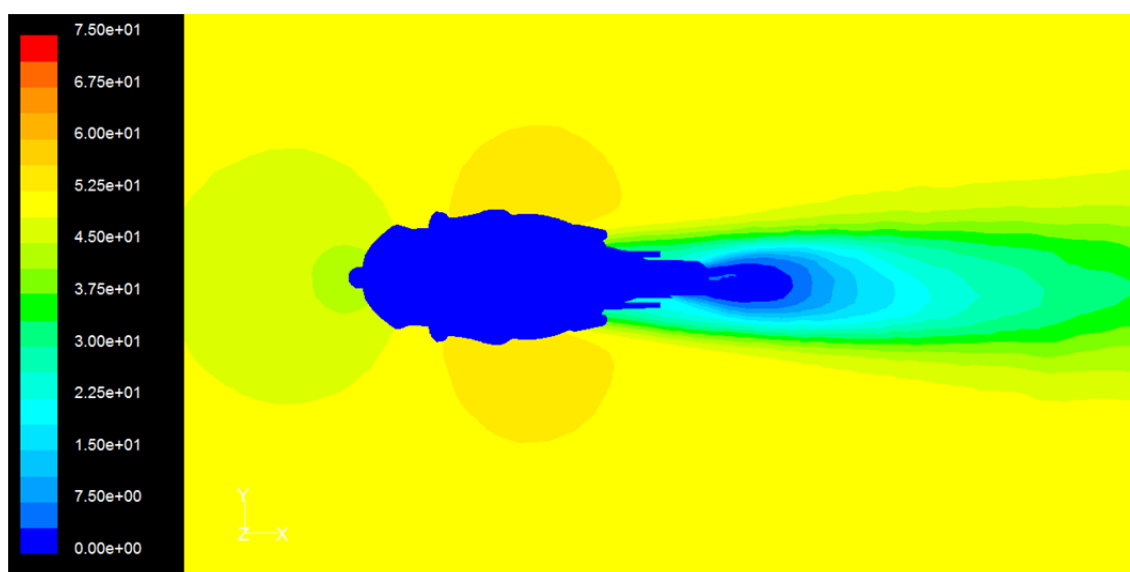
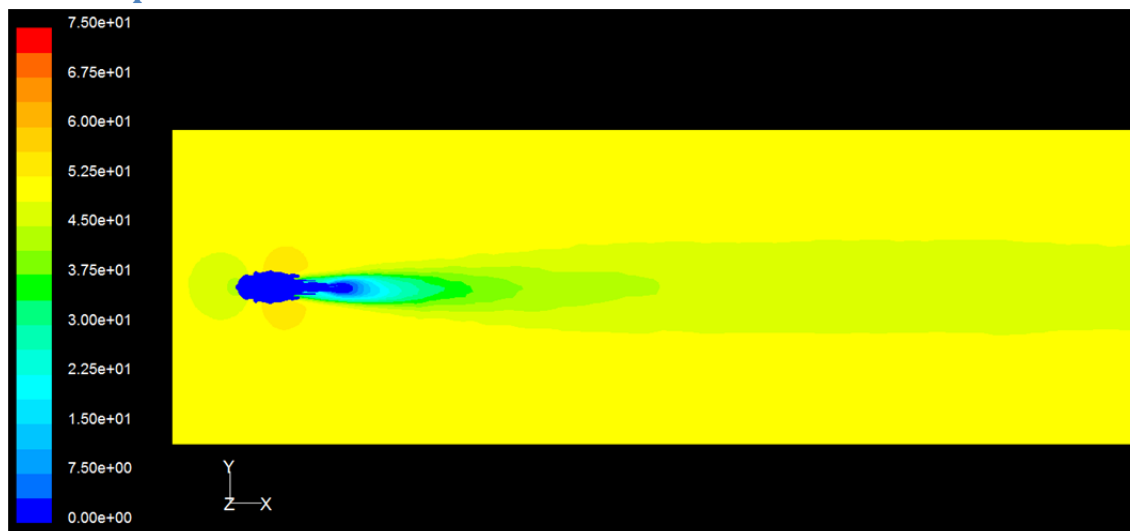


Figura Anexo I.8.

Vista superior Ariane 2012

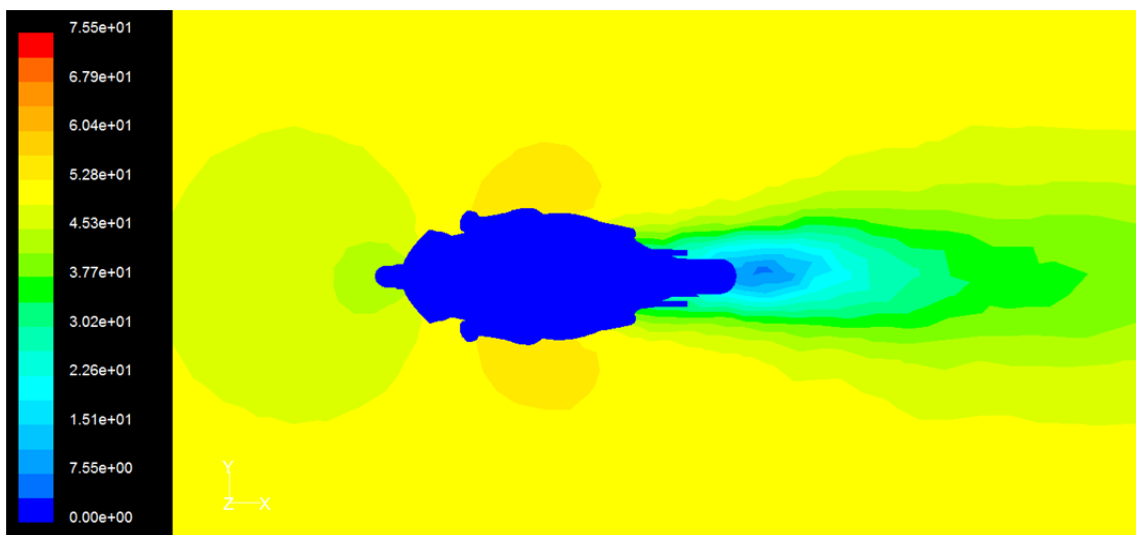
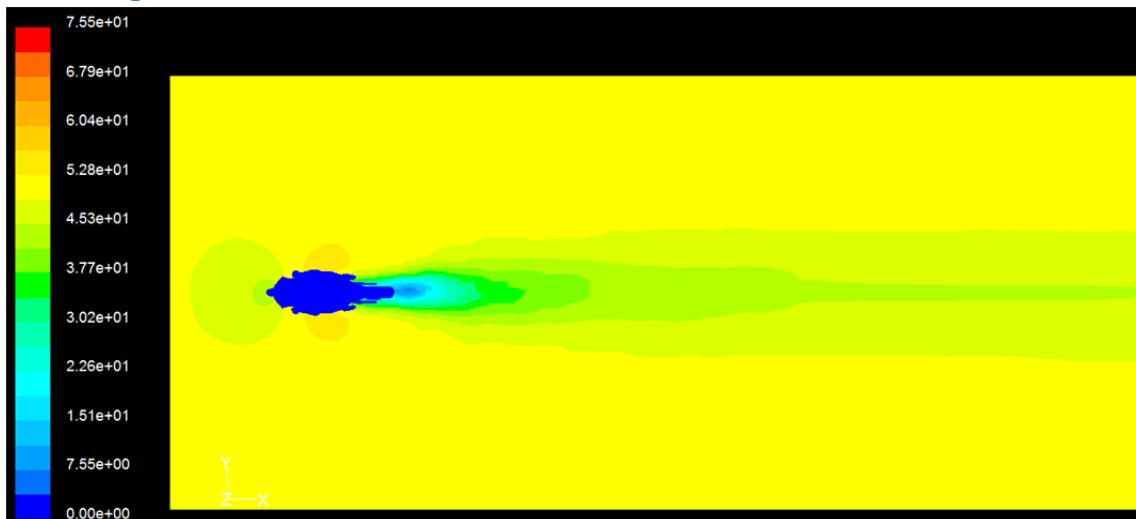


Figura Anexo I.9.

De las imágenes podemos extraer lo mismo que de las gráficas obtenidas con Excel. Podemos ver que la estela es más esbelta y suave en la moto del 2013 que en la del 2012.

Conclusiones

Tanto a nivel numérico como gráfico vemos una mejora en el estudio aerodinámico de la Ariane 2013 con respecto a la del 2012.

El coeficiente de resistencia (o de penetración) es menor en la 2013. Además de que al comparar los resultados de los estudios *con* y *sin* piloto vemos que la moto del 2013 recoge mejor al piloto, sometándose este a menos esfuerzos que le ayudará a estar en mejores condiciones a final de carrera, puesto que la diferencia de fuerza a la que es sometida la estructura de la 2013 es de 3 N, mientras que en la 2012 hay una diferencia de 20 N.

Con respecto a las estelas, en todas las comparaciones podemos ver una ligera mejora, ya que el área de la estela en los planos transversales es menor en la 2013 que en la 2012, puesto que aunque tienen prácticamente la misma altura, la de la 2013 es más esbelta. Esto hará que los rivales lo tengan más complicado para ponerse en la zona de rebufo y con ello les complicará que puedan adelantar más fácilmente en recta.

Como conclusión final, aunque estas diferencias no son excesivas, sí son notables y, por lo tanto, por poco que sea, en la práctica se notarán estas mejoras.